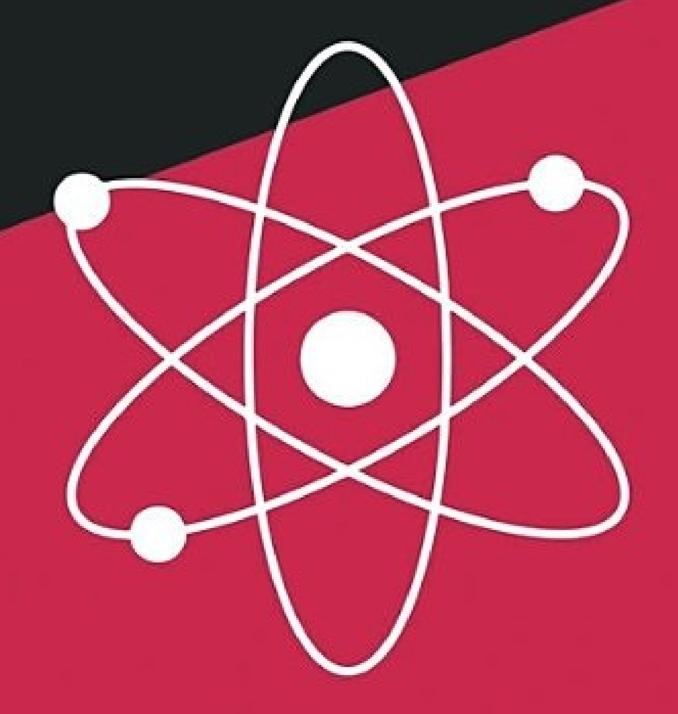






en 50 notions clés

L'essentiel pour tout comprendre

Blandine Pluchet



La Physique quantique



en 50 notions clés

Blandine Pluchet

FIRST
ÉDITIONS

La Physique quantique pour les Nuls en 50 notions clés

ISBN : 978-2-412-03872-7
ISBN numérique : 9782412042472
Dépôt légal : novembre 2018

Lecture-correction : Judith Aquien
Mise en page : Catherine Kédémos
Couverture : Soft Office

Éditions First, un département d'Édi8
12, avenue d'Italie
75013 Paris – France
Tél. : 01 44 16 09 00
Fax : 01 44 16 09 01
Courriel : firstinfo@efirst.com
Site Internet : www.pourlesnuls.fr

Ce livre numérique a été converti initialement au format EPUB par Isako www.isako.com à partir de l'édition papier du même ouvrage.

Introduction

À la découverte de l'infiniment petit

Pour la plupart d'entre nous, qui n'avons pas affaire au quotidien avec les réalités des scientifiques, le mot « quantique » revêt une connotation plutôt mystérieuse, et évoque souvent une physique quasi inaccessible, à la limite de l'intelligible commun.

Sans la physique quantique, notre monde moderne ne serait pourtant pas le même. C'est cette physique qui est capable de décrire, dans toute sa complexité, le monde de l'infiniment petit : elle formule les lois gouvernant les comportements des molécules, des atomes, de leurs noyaux, des particules de matière.

Penser l'impensable

Sa découverte au début du XXe siècle fut une révolution, autant scientifique que philosophique, et engendra nombre de débats intenses et passionnants. Car la manière dont elle appréhende la réalité dépasse notre entendement.

Le monde de l'infiniment petit n'obéit pas aux lois de la physique classique, celle qui décrit le monde macroscopique que nous palpons tous les jours. La physique quantique explore un monde inaccessible à nos sens, elle est contre-intuitive. Abstraite, les images simples n'ont pas leur place en physique quantique. Il s'agit alors de penser l'impensable.

Richard Feynman, physicien américain et grand acteur de cette physique, n'hésitait pas à en parler ainsi : « Je pense pouvoir dire sans trop me tromper que personne ne comprend la physique quantique. »

L'exploration du monde quantique

Dans cet ouvrage, il ne me sera donc pas possible de révéler tous les secrets de cette drôle de science, puisque selon les dires de Feynman, je ne la comprends pas moi-même. Mais je vais en revanche pouvoir vous introduire à toute sa fascinante complexité, à son étrangeté et ses paradoxes.

À travers 50 notions clés, entre lesquelles vous pourrez naviguer grâce à l'index en fin d'ouvrage, vous découvrirez comment cette physique est née, les idées et les événements qui la fondent, les physiciens qui l'ont pensée, sa formidable efficacité, mais aussi le débat sur la réalité du monde qu'elle initia.

Et, comme tous les voyages, ce voyage dans le monde quantique ouvrira de nouveaux horizons dans votre pensée.



1

LA PHYSIQUE CLASSIQUE

Dans l'histoire de la physique, la fin du XIXe siècle précède une révolution de la connaissance et des idées, celle qui va voir émerger de nouvelles conceptions du monde avec notamment la découverte de la physique quantique.

On regroupe sous l'appellation « physique classique » toutes les théories de la physique décrivant les phénomènes naturels à l'aube du XXe siècle.

La description du monde classique

Depuis le XVIIIe siècle, celui des Lumières, les milieux scientifiques sont extrêmement actifs et productifs. La liberté de penser est grande, les savants voyagent, les connaissances sont facilement échangées et transmises par les encyclopédies, les nombreux journaux spécialisés, les académies, les universités, etc.

L'ensemble des connaissances en physique (expliquant la majorité des phénomènes palpables par nos sens) se partagent entre trois domaines :

- La description des mouvements des corps et de leurs interactions est bien comprise grâce à la mécanique de Newton et sa théorie de la gravitation universelle. Les succès de cette théorie sont immenses, tant pour expliquer les mouvements des corps terrestres que célestes. Grâce à elle, en étudiant les anomalies de la trajectoire d'Uranus, on a, par exemple, pu découvrir la planète Neptune.
- La compréhension des phénomènes électriques et magnétiques est rendue possible par la théorie de l'électromagnétisme. Cette dernière décrit aussi les phénomènes optiques, la lumière étant à l'époque considérée comme une onde électromagnétique.
- L'essor de la machine à vapeur voit se développer la thermodynamique, qui décrit les phénomènes liés aux échanges de chaleur.

L'apogée de la connaissance scientifique

La physique de la fin du XIXe repose sur des bases mathématiques solides et est déterministe. À cette époque, la pensée des hommes de science est pleine d'assurance dans les savoirs acquis : beaucoup pensent qu'on arrive à l'apogée de la connaissance scientifique.

En 1871, le physicien écossais James Clerk Maxwell soutient que les hommes de science passeront désormais leur temps à ajouter quelques décimales aux grandes constantes de la physique. En 1895, Marcellin Berthelot, chimiste et biologiste français, dira : « Le monde est aujourd'hui sans mystère : la conception rationnelle prétend tout éclairer et tout comprendre ; elle s'efforce de donner de toute chose une explication positive et logique. » Vers 1900, Lord Kelvin, physicien britannique, affirme encore que la physique est achevée, à deux petits problèmes près, d'ailleurs en voie de résolution.

L'un de ces problèmes, celui du corps noir, va déstabiliser les principales théories physiques de l'époque et engendrer la révolution quantique.

Un débat au tournant du siècle

Dans les années 1900, un débat anime la communauté des scientifiques. Les choses qui se modifient dans les phénomènes naturels ressemblent-elles à des flux, comme un ruisseau, ou bien sont-elles transmises par des grains distincts les uns des autres qui composeraient la matière ? La physique de la chaleur, de l'électricité, du magnétisme et de la lumière

appréhende les choses de manière plutôt continue, comme des ondes, alors que la chimie penche pour l'atomisme, c'est-à-dire un monde constitué de corpuscules, et donc discontinu. Le débat ne sera clos qu'avec la formulation de la physique quantique et sa manière bien à elle de concevoir la réalité.

La physique classique

L'essentiel en 5 secondes

- **La physique classique regroupe les théories de la physique de la fin du XIXe siècle et permet d'expliquer la majorité des phénomènes terrestres et célestes connus.**
- **À cette époque, beaucoup pensent que la connaissance scientifique arrive à son apogée.**
- **Certains phénomènes restent cependant inexpliqués par la physique classique. Leur résolution initiera la physique quantique.**



2

LES ATOMES

Les hommes se questionnent depuis longtemps sur la réalité du monde et de la matière qui le constitue. L'idée d'atome est symbolique d'une des représentations qu'ils s'en font : celle d'un monde discontinu, composé de grains de matière.

Les atomistes antiques

À notre connaissance, l'atomisme est évoqué pour la première fois pendant l'Antiquité par les philosophes grecs. Démocrite (IVe siècle av. J.-C.) est considéré comme le père des atomistes. Selon eux, la matière n'est pas divisible à l'infini : ils appellent « atomes », du grec *atomos* (qui signifie « insécable »), les plus petits morceaux de matière. Pour eux, le monde est constitué d'atomes et de vide. Ces atomes, qui s'organisent pour créer tous les objets, tant terrestres que célestes, sont en nombre infini et immuables, mais les structures qu'ils forment ne sont pas éternelles : un jour, les atomes se dissocient et se dispersent à nouveau.

L'atomisme sera encore évoqué par Lucrèce (Ier siècle av. J.-C.) dans son ouvrage *De Rerum natura* (*De la Nature*) qui nous est parvenu. Mais cette théorie ne sera pas prise au sérieux avant le XIXe siècle, notamment à cause de la notion de vide dans lequel les atomes se déplacent : pour la plupart des savants, le vide ne peut pas exister.

La preuve que les atomes existent

Le débat sur l'existence des atomes revient sur le devant de la scène au XIXe siècle. Objets de polémique, les atomes partagent la communauté des scientifiques entre ceux qui considèrent qu'ils ne sont que des objets métaphysiques (la physique de la chaleur, de l'électromagnétisme ou de l'optique se passe très bien de ce concept), et ceux qui croient en leur existence (la majorité des chimistes). C'est le physicien allemand Albert Einstein (1879-1955) qui va apporter la preuve de l'existence des atomes en 1905, en s'intéressant au mouvement brownien.

Décrit par le botaniste écossais Robert Brown (1773-1858), il désigne le mouvement incessant de particules qui s'agitent dans un fluide, comme des grains de pollen dans une goutte d'eau.

En introduisant les statistiques pour décrire ces mouvements désordonnés, Einstein montre que ces derniers ne sont pas dus au hasard, mais sont déterminés par l'agitation des molécules d'eau (une molécule est assimilée à un atome) qui heurtent sans cesse les grains de pollen, les obligeant à changer sans arrêt de direction. Einstein prédit ainsi, par la théorie, l'existence des atomes. Quelques années plus tard, le savant français Jean Perrin (1870-1942) mène plusieurs expériences et confirme les prédictions d'Einstein.

Les atomes ne sont pas indivisibles

Leur existence prouvée, on constate bientôt que les atomes ne sont cependant pas tels que les décrivaient les philosophes antiques : il ne sont pas indivisibles. Des expériences montrent qu'ils sont au contraire composés en leur centre d'un noyau très dense et très petit, qui possède une charge électrique positive, et autour duquel se trouvent des particules chargées négativement : les électrons. Entre les noyaux et les électrons, c'est le vide.

Ces découvertes amènent alors au premier modèle d'atome, à l'image du système solaire : de la même manière que les planètes gravitent autour du Soleil, les électrons gravitent autour du

noyau.

Mais ce modèle de système planétaire miniature se trouve confronté à une difficulté : parce que les électrons portent une charge électrique, les lois de la physique classique prédisent que leur rotation leur fait perdre de l'énergie et qu'ils doivent s'écraser sur le noyau. La physique classique décrit donc les atomes comme des objets instables, ce qui est contraire à la réalité (notre monde ne pourrait exister sinon) : elle est inapte à expliquer les atomes. C'est une nouvelle physique qui va être inventée pour résoudre ces difficultés, une physique quantique.

Les atomes

L'essentiel en 5 secondes

- **L'idée que la matière serait constituée de corpuscules remonte à l'Antiquité, mais n'est pas prise au sérieux pendant plus de 2 000 ans.**
- **À l'aube du XXe siècle, le débat autour de l'atomisme prend de la vigueur et Einstein apporte la preuve de l'existence des atomes en 1905.**
- **Les atomes ne sont pas insécables : un premier modèle les décrit comme un système solaire miniature : des électrons gravitant autour d'un noyau.**


3
LES ONDES

La compréhension et la description des phénomènes naturels occupent les savants depuis des millénaires. Ils ont différentes manières de les appréhender et de modéliser leurs processus. À la fin du XIXe siècle, la plupart des physiciens pensent que les choses qui se modifient dans les phénomènes naturels se font d'une manière continue, sous la forme d'ondes.

Les ondes en images

Quand une pierre est lancée dans l'eau calme d'un lac, des vaguelettes se propagent en cercle autour de l'endroit où a plongé la pierre. Ces vaguelettes sont des ondes. Si elles voyagent à la surface du lac, l'eau ne se déplace pourtant pas : les vagues soulèvent les molécules d'eau lors de leur passage, mais ces dernières reprennent ensuite leur position initiale, sans suivre les vagues. Une onde est donc une perturbation qui voyage sans transport de matière, mais qui transporte, en revanche, de l'énergie avec elle : la vaguelette peut soulever un objet qui flotte sans le déplacer.

Au contraire des corpuscules dont les trajectoires peuvent être décrites avec précision, les ondes ne peuvent être précisément localisées : elles occupent une certaine étendue spatiale. Et elles ont la propriété de se superposer.

Les ondes sont caractérisées par leur longueur ou leur fréquence. Sur la surface du lac, la longueur d'onde correspond à la distance entre deux sommets de vaguelettes. Elle est grande si les vaguelettes sont éloignées, courte si elles sont rapprochées. La fréquence (l'inverse de la longueur d'onde) est, quant à elle, grande si la longueur d'onde est courte, et petite si la longueur d'onde est grande.

Nombreux sont les phénomènes montrant un comportement ondulatoire dans la nature : les vagues, mais aussi le son qui se propage dans l'air, ou encore les tremblements de terre. Ces ondes sont qualifiées de mécaniques parce qu'elles se propagent dans des milieux aux propriétés élastiques (eau, air, etc.).

Les ondes électromagnétiques

Il existe un autre type d'ondes qui, elles, se propagent dans le vide : ce sont les ondes électromagnétiques, grâce auxquelles ont peut décrire les phénomènes électriques, magnétiques, mais aussi lumineux. À la fin du XIXe siècle, les physiciens découvrent que la lumière est elle-même une onde électromagnétique.

ÉTHER OU VIDE ?

Les physiciens ont longtemps cherché le milieu dans lequel se propageraient les ondes électromagnétiques, qu'ils appelaient « éther », jusqu'à ce qu'Einstein montre que ce dernier n'existe pas et que les ondes électromagnétiques se diffusent d'elles-mêmes dans le vide.

On ne peut pas voir les ondes électromagnétiques, mais postuler leur existence aide à rendre compte des observations. Les observations se rapportant à la propagation de la lumière sont toutes bien expliquées grâce à elles, à l'exception de l'interaction de la matière avec la lumière (l'émission et l'absorption de lumière par la matière). C'est la physique quantique qui va résoudre ces difficultés.

Le spectre électromagnétique

Au XVIIe siècle, le savant Isaac Newton montre que l'on peut décomposer la lumière en diverses couleurs (l'arc-en-ciel), correspondant à des longueurs d'ondes variées. Celles-ci ne représentent pourtant que la lumière visible.

Une grande partie des ondes lumineuses sont en effet invisibles à l'œil nu. Si nos yeux sont sensibles à la lumière visible, c'est parce que le Soleil rayonne surtout dans celle-ci. On découvre les rayonnements lumineux invisibles à partir du XIXe siècle, qui composent avec la lumière visible ce que les physiciens appellent le spectre électromagnétique. Ce dernier classe par fréquence ou longueur d'onde toute la gamme des lumières, toute la gamme des ondes dites électromagnétiques.

Par longueurs d'onde décroissantes, la lumière se décompose ainsi en ondes radios, micro-ondes, infrarouges, visible, ultraviolet, rayons X, puis gamma. Les ultraviolets, rayons X et gamma sont nocifs pour la vie, et sont filtrés par l'atmosphère.

Les ondes

L'essentiel en 5 secondes

- **Une onde est une perturbation qui voyage sans déplacer de matière mais transporte de l'énergie.**
- **Les ondes électromagnétiques aident à décrire les phénomènes électriques, magnétiques ou lumineux. Elles se propagent dans le vide.**
- **Le spectre électromagnétique classe toutes les ondes électromagnétiques : il contient toute la gamme des lumières, visibles et invisibles.**


4
LE CORPS NOIR

En science, les découvertes sont souvent faites de manière improbable. Dans l'histoire de la physique, c'est la résolution, au tout début du XXe siècle, d'un mystère que les savants appellent « le problème du corps noir » qui donne naissance de manière imprévue à la physique quantique. Avec elle sera livrée une toute nouvelle vision du monde de l'infiniment petit, à l'encontre de la pensée attachée à la physique classique.

Qu'est-ce qu'un corps noir en physique ?

Il suffit d'observer des braises dans un feu pour constater qu'elles ne rayonnent pas toujours de la même couleur : elles peuvent être blanches si elles sont très chaudes, sinon jaunes, ou encore rouges lorsque le feu touche à sa fin. C'est parce que la couleur des braises est liée à leur température. Ce phénomène est bien connu depuis l'Antiquité par tous ceux qui travaillent avec le feu, comme les métallurgistes, les potiers ou les verriers, qui pouvaient ainsi évaluer la température de leur four.

Dans le courant du XIXe siècle, des physiciens cherchent une théorie pour décrire la lumière – c'est-à-dire le spectre électromagnétique – émise par les corps denses et chauds en fonction de la température. Pour étudier ce phénomène, ils imaginent ce qu'ils appellent un « corps noir » : le corps noir est un corps idéal qui absorbe la totalité du rayonnement qu'il reçoit (d'où son nom), et que les physiciens simulent par une boîte fermée. En chauffant progressivement ce four idéal, les physiciens analysent le spectre de la lumière qui s'en échappe par un petit trou percé dans une paroi. Dans le corps noir, le spectre électromagnétique ne dépend que de la température.

Le problème…

En science, une théorie est considérée comme valable seulement si elle fait des prédictions qui sont vérifiées par des observations ou des expériences. Théorie et expérience sont donc deux facettes inséparables de la science pour aborder les phénomènes du monde dans lequel nous vivons : elles doivent concorder.

Concernant le comportement du corps noir, de nombreuses mesures ont été effectuées au cours du XIXe siècle, et les physiciens possèdent des graphiques précis représentant l'intensité des diverses longueurs d'ondes du spectre électromagnétique pour différentes températures. Mais quand il s'agit de trouver une formule mathématique pour les modéliser, ça se complique.

La physique du XIXe siècle s'appuie sur les connaissances en mécanique (la description du mouvement des corps), en thermodynamique (la physique de la chaleur) et en électromagnétisme (la physique des ondes lumineuses). De nombreux physiciens tentent de trouver la formule mathématique qui s'appliquerait parfaitement à la forme des courbes trouvées expérimentalement, sans malheureusement y parvenir. Dans le domaine des ondes ultraviolettes notamment, la théorie prévoit une intensité lumineuse infinie qui est en contradiction avec les données observationnelles : les physiciens parlent de « catastrophe ultraviolette ».

… Et sa résolution

Le physicien allemand Max Planck (1858-1947) s'intéresse à son tour au problème du corps noir pour essayer de résoudre des questions thermodynamiques qui le préoccupent. C'est en

tâtonnant qu'il va trouver la formule adéquate, en utilisant un artifice mathématique dont il ne mesure pas la portée. Il divise l'énergie du rayonnement électromagnétique issu du corps noir en de très nombreuses petites quantités d'énergie, et aboutit à une formule qui fonctionne. En décembre 1900, il présente ses résultats à la société de physique de Berlin, sans en maîtriser l'interprétation physique. Postulant que le rayonnement s'échappant du corps noir le fait par petites quantités d'énergie, il introduit la discontinuité et les quanta d'énergie en physique. C'est la naissance de la physique quantique.

UN ACTE DE DÉSESPOIR

Il est souvent raconté que Planck, prenant par la suite conscience de la portée de sa découverte, la qualifia « d'acte de désespoir ». Il n'adhérera en tout cas jamais au concept de quantification de l'énergie, contraire à ses convictions.

Le corps noir

L'essentiel en 5 secondes

- **Un corps noir est un corps idéal qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit. Les physiciens étudient la lumière qu'il diffuse en fonction de sa température.**
- **Jusqu'à la fin du XIXe siècle, les physiciens ne parviennent pas à trouver une théorie décrivant les mesures relatives au corps noir.**
- **La résolution du problème du corps noir par le physicien Max Planck marque la naissance de la physique quantique.**



5

LES QUANTA

Donnant son nom à la physique quantique, « quanta » est le pluriel du mot latin *quantum* (« combien »). *Quantum* se retrouve dans « quantité », et les physiciens choisissent d'utiliser ce mot pour désigner la quantité élémentaire d'une grandeur comme l'énergie, dont ils introduisent la quantification au tout début du XXe siècle pour expliquer certains phénomènes restés jusqu'alors mystérieux.

L'introduction des quanta en physique

Pour résoudre le problème du corps noir – qui reste une énigme pour les scientifiques depuis le XIXe siècle –, le physicien Max Planck choisit de quantifier l'énergie du rayonnement qu'il émet, c'est-à-dire de la diviser en petits paquets élémentaires (appelés par la suite « quanta d'énergie ») : le rayonnement électromagnétique émis par le corps noir n'est alors plus continu, à l'image d'une onde (comme le décrit la physique classique). Grâce à cette hypothèse – que Planck ne considère d'ailleurs que comme un artifice mathématique (il ne mesure pas la portée de son interprétation) –, il résout le problème du corps noir.

Planck montre ainsi que le transfert d'énergie entre la matière et la lumière qu'elle émet ne peut se faire que par petits paquets (les quanta), et ne se produit donc pas de manière continue, mais discontinue : le rayonnement électromagnétique devient quantifié. Les échanges d'énergie ne peuvent avoir lieu que par multiples entiers d'une quantité minimale : un quantum d'énergie. La quantité d'énergie transportée par un quantum varie par ailleurs avec la fréquence du rayonnement électromagnétique (l'ultraviolet transporte plus d'énergie que l'infrarouge).

Mathématiquement parlant, l'énergie d'un quantum est égale à sa fréquence multipliée par une nouvelle constante de la physique introduite par Planck : la constante de Planck, clé de voûte de la physique quantique.

Les quanta d'Einstein

Albert Einstein, qui a prouvé l'existence des atomes et montré la discontinuité de la matière, se penche sur une autre difficulté, celle de l'effet photoélectrique : un rayon lumineux dirigé vers un métal produit un courant électrique. Pour résoudre cette énigme que la physique classique ne parvient pas non plus à élucider, Einstein postule que la lumière est constituée de petites particules, des quanta de lumière que l'on appellera plus tard « photons ». Partant de cette hypothèse, il réussit à expliquer l'effet photoélectrique.

La théorie des quanta

La quantification de l'énergie puis de la lumière qui caractérise la physique quantique à ses débuts permet donc de comprendre le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique.

Le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) reprend à son tour le concept de quanta pour créer un nouveau modèle d'atome : les électrons en orbite autour du noyau ont une énergie quantifiée. Les électrons se trouvant sur une même orbite possèdent tous une énergie identique, et n'émettent pas de rayonnement : l'atome est ainsi stable. Ce modèle d'atome explique la répartition des éléments dans la table périodique de Mendeleïev ainsi que les raies observées dans les spectres émis par les éléments.

Grâce, notamment, aux apports de Planck, Einstein et Bohr, une nouvelle physique naît, qu'on appelle dans un premier temps la « théorie des quanta », car elle est fondée sur l'aspect discontinu des phénomènes, quantifiant l'énergie.

Mais la théorie des quanta n'est pas la physique quantique : cette dernière, formulée peu à peu par la suite, décrira le monde de l'infiniment petit sous l'aspect discontinu aussi bien que continu.

Au contraire de la physique classique (qui réserve les aspects d'ondes et de corpuscules à des entités différentes), la physique quantique applique ces deux notions aux mêmes entités.

Les quanta

L'essentiel en 5 secondes

- **Pour expliquer le problème du corps noir, Max Planck quantifie l'énergie qu'il émet et introduit par là la notion de quantum d'énergie.**
- **Albert Einstein démontre pour sa part que la lumière est aussi faite de quanta, les photons.**
- **La physique quantique à ses débuts, sous la forme de la théorie des quanta, repose sur la discontinuité des phénomènes.**

6

LA CONSTANTE DE PLANCK

Grandeur à portée universelle symbolisée par la lettre *h*, la constante de Planck est l'emblème de la physique quantique, mais aussi sa clé de voûte. Si elle était nulle, le monde de l'infiniment petit serait gouverné par les lois de la physique classique.

Son histoire

Cette constante est définie en 1900 par le physicien allemand Max Planck lorsqu'il trouve la formule pour résoudre le problème du corps noir. Pour décrire le rayonnement émis par ce dernier, il relie son énergie à sa fréquence par un facteur de proportionnalité. En hommage à Max Planck, son nom est donné à la constante qui relie la fréquence d'un rayonnement lumineux à l'énergie du photon qu'elle transporte.

On raconte que Planck choisit d'appeler cette constante avec la première lettre d'un des mots allemands *Hilfe* (« à l'aide ! ») ou *helfen* (« aider »).

Une constante universelle

Une constante est une grandeur physique associée à une valeur numérique qui est fixe. Une constante universelle ne varie ni dans le temps, ni dans l'espace : elle a la même valeur dans notre galaxie ou aux confins du cosmos, aujourd'hui ou dans le passé de l'Univers. La constante de Planck, *h*, est une constante universelle, comme *c*, la vitesse de la lumière, ou encore *G*, la constante gravitationnelle.

Les constantes physiques sont les pierres angulaires de toute la physique. Leurs valeurs sont fondamentales : si elles étaient différentes, l'Univers serait différent, car les lois qui gouvernent l'Univers sont reliées aux constantes.

La constante de Planck vaut $6{,}63.10^{-34}$ joule.seconde : elle possède les dimensions d'une énergie multipliée par le temps.

Constante de Planck et compagnie

La constante de Planck est à la base de toute la physique quantique. Elle intervient notamment dans la quantification de l'énergie, mais aussi dans la formulation du principe d'incertitude.

Diverses unités ont été dérivées de la constante de Planck :

- Le temps de Planck (10^{-43} s) est la plus petite mesure de temps à laquelle les physiciens ont accès. Au-delà, les lois cessent d'être valides.
- La longueur de Planck (10^{-33} cm) définit quant à elle la limite des possibilités d'observation du monde de l'infiniment petit.
- La température de Planck (10^{32} °C) représente la limite à laquelle la physique moderne est apte à décrire la matière.

Dans l'histoire de l'Univers décrite par la théorie du Big Bang, on parle du « mur de Planck ». Mur symbolique, il définit l'horizon de la connaissance actuelle : au-delà du mur de Planck, les théories ne peuvent plus décrire l'Univers.

La constante de Planck

L'essentiel en 5 secondes

- **La constante de Planck est l'emblème de la physique quantique.**
- **Elle a été définie par le physicien Max Planck dans la résolution du problème du corps noir.**
- **C'est une constante universelle : cela veut dire que sa valeur reste la même partout dans l'Univers et dans le temps.**



7

L'ÉLECTRON

L'électron, l'une des quelques particules élémentaires qui constituent notre monde, est un des principaux protagonistes de la scène quantique. Sa découverte et la description de son comportement participent en première ligne à l'avènement de cette nouvelle physique au début du XXe siècle.

La découverte de l'électron

Depuis l'Antiquité, on sait que l'ambre, préalablement frotté (par exemple avec de la fourrure), attire à lui de petits objets. Ce phénomène – comme la foudre – est l'un des premiers contacts de l'homme avec l'électricité. Les mots « électricité » et « électron » viennent d'ailleurs du grec ancien *elektron* (« ambre jaune »).

Si à cette époque personne ne comprend encore la raison de ce phénomène (qui est dû au déplacement de particules électriquement chargées), les connaissances à la fin du XIXe siècle amènent un certain nombre de savants à évoquer l'existence d'une particule d'électricité qu'ils nomment « électron ». Mais, pour la plupart, les phénomènes électriques sont plutôt de nature ondulatoire.

La découverte de l'électron est attribuée au physicien anglais Joseph John Thomson (1856-1940), dont les travaux expérimentaux fournissent la preuve de l'existence en 1897. Historiquement, l'électron est d'ailleurs la première particule élémentaire à avoir été mise en évidence. En 1911, le physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937) propose un modèle atomique dans lequel l'atome est constitué d'un noyau de charge positive entouré par un nuage d'électrons.

Caractéristiques

L'électron est donc une particule élémentaire, l'une des plus légères, et il porte une charge électrique négative. Par cette charge, il est particulièrement sensible à l'une des quatre forces fondamentales de la physique : la force électromagnétique, qui le retient au noyau de l'atome chargé quant à lui positivement.

Le nombre d'électrons en orbite autour du noyau définit le type d'atome. L'hydrogène n'en possède qu'un seul, l'oxygène huit, l'uranium, le plus lourd des atomes stables, quatre-vingt-douze. Lorsqu'un atome perd des électrons, on dit qu'il s'ionise. La mise en commun d'électrons entre des atomes entraîne la formation des molécules. Des électrons libres se déplaçant dans le vide ou dans un métal produisent un courant électrique. Les électrons énergétiques en provenance du Soleil provoquent encore les aurores boréales en pénétrant dans l'atmosphère.

L'électron joue, de manière générale, un grand rôle dans d'innombrables processus naturels : électricité, magnétisme, réactions chimiques, émission et absorption de lumière par la matière. Bref, l'électron est partout.

L'électron en physique quantique

La découverte de l'électron au tournant du XXe siècle vient appuyer l'idée de discontinuité dans les phénomènes naturels. La compréhension du comportement et du rôle de cette particule

dans les phénomènes étudiés par les physiciens en fait l'un des acteurs principaux du développement de la physique quantique.

Entrant en scène dans l'explication de l'effet photoélectrique par Einstein, son orbite quantifiée dans l'atome par Bohr expliquant les raies spectrales et la table périodique, l'électron vient valider la théorie des quanta. Le travail de Louis de Broglie montre par la suite qu'il est tout à la fois onde et particule, et celui de Paul Dirac lui découvre une antiparticule, le positron, qui révèle l'existence de l'antimatière.

Un électron accéléré peut aussi rayonner de l'énergie sous forme de photons, dans toute la gamme du spectre électromagnétique, et la lumière émise par les matériaux chauffés est due aux changements d'orbite des électrons dans l'atome.

L'électron

L'essentiel en 5 secondes

» **La découverte de la particule électron fait entrer le discontinu dans les phénomènes électriques décrits jusqu'alors sous la forme d'ondes.**

» **L'électron joue un grand rôle dans d'innombrables processus naturels.**

» **La description du comportement de l'électron participe en tout premier plan à l'avènement de la physique quantique.**


8
LE PHOTON

La particule de lumière, le photon – du grec *photos* (« lumière ») – est avec l'électron l'autre grand acteur sur la scène quantique et dans la naissance de la nouvelle physique au début du XXe siècle.

Une particule de lumière

La nature de la lumière est discutée tout au long de l'histoire de la physique, tour à tour considérée comme une onde ou composée de corpuscules.

Au XVIIIe siècle, l'idée que la lumière est constituée de particules domine, car elle est revendiquée par Isaac Newton, dont l'influence, grâce à ses innombrables contributions en physique, est immense.

Au début du XIXe cependant, certains phénomènes lumineux sont mieux compris si l'on considère la lumière comme une onde, comme par exemple les interférences. L'étude de la propagation des rayons lumineux renforce d'ailleurs le point de vue ondulatoire. À la fin du XIXe, il est démontré que la lumière est une onde électromagnétique, et l'idée de particule est mise de côté.

La théorie ondulatoire ne rend pourtant pas compte de toutes les propriétés de la lumière. Comme Planck a quantifié l'énergie pour décrire le rayonnement du corps noir, Einstein décide à son tour de quantifier l'énergie transportée par la lumière pour expliquer l'effet photoélectrique, resté incompris dans le cadre de la théorie ondulatoire. Il introduit alors l'hypothèse de quanta lumineux. Après la découverte de l'effet Compton qui valide par l'expérience leur existence, le début du XXe siècle voit la particule de lumière – qui prend dans les années 1920 le nom de photon – emporter à nouveau l'adhésion de la majorité des physiciens.

Les développements ultérieurs de la physique réconcilient enfin les deux aspects de la lumière : en physique quantique, la lumière est de nature duale, elle se propage comme une onde, mais montre aussi un caractère corpusculaire.

Caractéristiques

Imaginer un photon comme une bille de lumière est trop simpliste : l'image trouve difficilement sa place en physique quantique, car la réalité de l'infiniment petit est autrement plus complexe. Si la lumière est une onde électromagnétique, le photon est une sorte de paquet d'énergie de ce rayonnement, un quantum de lumière, dont l'énergie définit le type d'onde électromagnétique (radio, visible, gamma, etc.).

Les photons sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière : on ne peut vraiment parler de photon qu'au moment de ces interactions.

Cet étrange grain de lumière a une masse nulle, ne porte pas de charge électrique, et se déplace à la vitesse de la lumière. Selon la théorie de la relativité d'Einstein, le temps n'existe donc pas pour lui : entre le moment où il est émis et celui où il est détecté, aucun temps ne s'écoule.

Les photons sont extrêmement nombreux dans l'Univers : les astrophysiciens en dénombrent cinq cents par centimètre cube.

Photons et électrons, intimité quantique

En physique quantique, si les photons et les électrons sont des particules différentes, ils sont intimement liés et interviennent ensemble dans les phénomènes.

Quand un électron change d'orbite dans un atome, il absorbe ou émet de l'énergie, sous la forme d'un photon. Quand des électrons libres sont en mouvement, ils émettent des photons et inversement, l'absorption de photons par les électrons les met en mouvement : ce phénomène est par exemple utilisé dans les antennes de radio. L'annihilation de l'électron avec son antiparticule (le positron) crée enfin des photons et, sous certaines conditions, des photons peuvent devenir électrons et positrons.

Le photon

L'essentiel en 5 secondes

- **La nature de la lumière balance plusieurs siècles durant entre les ondes et les particules jusqu'à ce que la physique quantique lui attribue une nature duale.**
- **Le photon est un quantum de lumière, une sorte de particule élémentaire associée à une onde électromagnétique.**
- **En physique quantique, les photons et les électrons sont intimement reliés dans la description des phénomènes.**


9
L'EFFET
PHOTOÉLECTRIQUE

Un courant électrique peut être créé dans un matériau exposé à la lumière. L'explication donnée par Einstein à ce phénomène – appelé « effet photoélectrique » – marque une nouvelle étape dans le développement de la physique quantique.

Un phénomène d'abord incompris

L'effet photoélectrique est mis en évidence au début du XIXe siècle : certains matériaux – généralement des métaux – émettent des électrons quand ils sont soumis à un rayonnement électromagnétique (infrarouge, lumière visible, ultraviolet, etc.). Ce phénomène reste cependant incompris dans le cadre de la physique classique.

La théorie de l'électromagnétisme (pour laquelle la lumière est une onde) ne parvient notamment pas à expliquer pourquoi certaines combinaisons de matériaux et de fréquences lumineuses ne donnent pas lieu à l'effet photoélectrique. Selon cette théorie, le phénomène devrait pourtant se produire à n'importe quelle fréquence, pourvu que l'intensité lumineuse soit suffisante.

L'explication d'Einstein

Pour décrire le rayonnement du corps noir, Max Planck quantifia les échanges d'énergie entre la matière et la lumière. Mais s'il s'agissait pour lui d'une simple loi de quantification dont l'objectif était de résoudre ce problème, Einstein va plus loin : il postule, en 1905, que la quantification de l'énergie est une propriété de la lumière elle-même.

Selon lui, le rayonnement lumineux est constitué de particules – des quanta de lumière, plus tard nommés « photons » – qui transportent une certaine quantité d'énergie, dont la valeur est proportionnelle à leur fréquence : par exemple, une particule de lumière infrarouge – dont la fréquence est moindre –, charrie moins d'énergie qu'une particule de lumière ultraviolette.

Partant de cette hypothèse, Einstein peut mettre au clair l'effet photoélectrique. Lorsqu'un photon rencontre un matériau, il est absorbé par un électron. Si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron, ce dernier peut être émis : l'effet photoélectrique ne peut être enclenché que quand l'électron absorbe un photon transportant suffisamment d'énergie pour l'extraire de l'atome. Le seuil d'énergie pour extraire un électron dépend ainsi du matériau.

C'est l'existence de ce seuil, non prévu par la physique classique, qui explique en particulier pourquoi certaines combinaisons de matériaux et de fréquences ne déclenchent pas l'effet photoélectrique. Si les électrons d'un matériau donné ont besoin d'une énergie équivalente à celle portée par des photons ultraviolets, un rayonnement infrarouge ne pourra jamais enclencher l'effet photoélectrique, quelle que soit son intensité. L'énergie du photon étant liée à sa fréquence, c'est donc cette dernière qui est déterminante et non l'intensité de la lumière.

En 1921, Einstein reçoit le prix Nobel pour l'explication de l'effet photoélectrique.

L'ANNÉE MIRACULEUSE

L'année 1905 est surnommée « l'année miraculeuse d'Einstein » car il y publie quatre articles qui vont profondément modifier le visage de la physique : il postule dans le premier l'existence des quanta de lumière, amène dans le deuxième la preuve de l'existence des atomes, présente dans le troisième la théorie de la relativité restreinte et montre dans le quatrième l'équivalence entre la masse et l'énergie, $E = mc^2$.

En pratique

L'effet photoélectrique est aujourd'hui utilisé dans le fonctionnement de nombreux instruments de notre quotidien : on trouve des cellules photoélectriques dans les téléphones portables, les détecteurs de proximité, les systèmes de sécurité, etc.

Cet effet est aussi à la base de la photovoltaïque qui produit de l'électricité grâce au rayonnement solaire : lorsque la lumière du Soleil rencontre les cellules photovoltaïques du panneau solaire, les photons sont absorbés et un courant électrique est généré.

L'effet photoélectrique

L'essentiel en 5 secondes

- **Certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière : c'est l'effet photoélectrique.**
- **Einstein explique en 1905 l'effet photoélectrique en postulant que la lumière est composée de particules.**
- **L'effet photoélectrique est par exemple à la base des cellules photovoltaïques.**

10

LA DUALITÉ

DE LA LUMIÈRE

Le caractère dual de la lumière montre toute l'étrangeté de la physique quantique, et illustre la difficulté à se représenter le monde de l'infiniment petit.

Onde ou particule ?

La nature de la lumière fut l'objet de controverses qui traversèrent les siècles. Onde pour certains, constituée de particules pour d'autres, les différentes observations, les résultats d'expériences et les théories variées rendent le choix difficile entre ces deux conceptions des rayons lumineux. Et la physique classique ne parvient pas à résoudre cette contradiction.

Le modèle ondulatoire décrit la propagation de la lumière. C'est grâce à ce modèle que l'on peut notamment comprendre l'expérience des fentes de Young, dans laquelle un rayon lumineux passant par deux fentes crée une figure d'interférence sur un écran (se manifestant *via* l'alternance de franges sombres et lumineuses).

Le modèle corpusculaire explique l'interaction de la lumière avec la matière, son émission et son absorption, comme dans le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique.

Onde et particule !

La naissance de la physique quantique va lever l'apparente contradiction sur la nature de la lumière.

À la suite de la découverte du photon, Einstein introduit le concept de dualité de la lumière : celle-ci est onde et/ ou corpuscule. Le comportement d'un rayon lumineux peut être décrit, selon l'expérience, soit sous la forme d'onde, soit sous la forme de particules.

Les équations de la physique quantique font d'ailleurs apparaître la nature autant ondulatoire que corpusculaire de la lumière : l'énergie portée par le photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique qui lui est associée.

On considère aujourd'hui en physique quantique que la lumière n'est ni une particule, ni une onde : sa nature dépasse ces deux concepts. L'existence du photon explique l'interaction de la lumière et de la matière, mais on ne peut parler de photon qu'au seul moment de l'interaction. En dehors de celle-ci, on ne sait pas quelle forme a le rayonnement.

La dualité en général

Le physicien français Louis de Broglie (1892-1987) propose en 1924 qu'on attribue à toutes les particules matérielles une dualité onde-particule, comme pour la lumière. De la même manière que l'on associe une onde électromagnétique aux photons, de Broglie relie une onde de matière aux autres particules.

Le comportement ondulatoire des électrons est démontré quelques années plus tard, et on étend bientôt cette dualité à toutes les particules de matière – la dualité étant cependant observée uniquement au niveau microscopique.

LEÇON D'ORNITHORYNQUE

La découverte de l'ornithorynque déconcerta les savants. Bec de canard sur corps de castor, il pond des œufs mais allaite ses petits. Ni ovipare, ni mammifère, il fallut lui inventer une nouvelle catégorie, celle des monotrèmes. Mais l'ornithorynque est seulement paradoxal au vu des anciennes catégories.

Selon ce même modèle, la dualité onde-corpuscule semble paradoxale face aux catégories de la physique classique, qui sépare ces deux concepts. En physique quantique, le comportement des objets transcende ces catégories : les objets en question ne sont ni onde, ni corpuscule, ils sont autre chose, comme l'ornithorynque.

La dualité de la lumière

L'essentiel en 5 secondes

» **Pour la physique classique, la nature de la lumière est paradoxale : elle montre, selon les observations, un aspect ondulatoire ou corpusculaire.**

» **Avec la naissance de la physique quantique, les savants introduisent l'idée que la lumière est à la fois onde et particule.**

» **Louis de Broglie étend cette dualité onde-corpuscule à toutes les particules de matière, comme l'électron.**



11

L'ATOME QUANTIQUE

Depuis que l'existence de l'atome a été prouvée, au tout début du XXe siècle, les physiciens cherchent à connaître sa structure. Les expériences montrent en effet que ce dernier n'est pas insécable, contrairement à ce qu'en dit son nom : il est constitué d'un noyau et d'électrons.

L'atome comme un système solaire

Un premier modèle s'appuyant sur les connaissances en physique classique représente l'atome comme un système solaire miniature. Les électrons sont en orbite circulaire dans un même plan autour du noyau, comme les planètes gravitent autour du Soleil dans le plan de l'écliptique. Ce modèle séduit d'abord la communauté des physiciens car il unifie l'infiniment grand et l'infiniment petit.

Mais un électron est une particule chargée électriquement et sa rotation autour du noyau, selon les lois de l'électromagnétisme, lui fait perdre de l'énergie qui l'amène à effectuer une spirale autour du noyau pour finir par s'y écraser : selon la physique classique, l'atome est donc instable, ce qui contredit l'existence de notre monde. Pour décrire l'atome, il faut inventer une nouvelle physique.

L'atome selon Bohr

En 1913, le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) propose un nouveau modèle d'atome stable en s'inspirant de la toute nouvelle physique des quanta, et invente le premier modèle d'atome quantique.

La description de la structure de l'atome de Bohr repose sur deux postulats :

» Les électrons tournent autour du noyau en se déplaçant seulement sur certaines orbites circulaires autorisées, qui correspondent à une énergie déterminée. Bohr établit ainsi la stabilité de l'atome, sans pour autant lui donner une explication. Dans le cadre de ce modèle, seules certaines trajectoires sont autorisées aux électrons, les autres, comme la spirale, étant interdites.

» Il y a émission d'un rayonnement seulement lorsqu'un électron saute d'une orbite à une autre orbite d'énergie inférieure. Le rayonnement est émis sous forme d'un photon dont l'énergie correspond à la différence d'énergie entre les deux orbites. Par ailleurs, si l'électron saute vers une orbite d'énergie supérieure, il absorbe un photon. L'orbite dont l'énergie est la plus faible correspond à l'état fondamental de l'électron : il ne peut descendre plus bas et ne peut donc tomber sur le noyau.

Bohr calcule également que le noyau de l'atome est extrêmement massif mais minuscule (10 000 fois plus petit que l'atome). Les orbites des électrons étant très éloignées du noyau, l'atome est essentiellement constitué de vide ! Son modèle est un succès parce qu'il explique notamment les raies spectrales et l'organisation des éléments dans le tableau périodique.

L'abandon de l'image

Les développements de la physique quantique verront par la suite l'abandon de la notion d'« orbite ». On considère maintenant que les électrons se trouvent dans certains états particuliers caractérisés par leur énergie, mais on ne leur associe plus de trajectoire définie au sein de l'atome. Un saut quantique – le passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre avec émission ou absorption d'un photon – est un événement non visualisable.

Aujourd'hui, l'atome de la physique quantique ne peut plus être représenté par un dessin : seules les mathématiques sont aptes à le décrire.

De manière générale, les objets quantiques ne peuvent être symbolisés par une image. Si cette abstraction déroute, les formidables prédictions de la physique quantique suffisent à convaincre de son efficacité.

L'atome quantique

L'essentiel en 5 secondes

- **Le premier modèle de la structure de l'atome le représente comme un système solaire miniature, mais ne rend pas compte de sa stabilité.**
- **Niels Bohr développe un modèle d'atome quantique : les électrons tournent autour du noyau sur des orbites dont l'énergie est quantifiée. Lorsqu'ils sautent d'une orbite à l'autre, ils émettent ou absorbent de la lumière.**
- **La physique moderne considère les objets quantiques comme des concepts abstraits, ne pouvant être décrits que par les mathématiques.**

12

LES RAIES SPECTRALES

L'explication de la nature des raies observées par les physiciens au sein des spectres électromagnétiques est apportée en 1913 grâce au modèle d'atome quantique du physicien Niels Bohr. Cette découverte est une preuve supplémentaire en faveur de la théorie quantique.

L'énigme des raies

À la suite d'Isaac Newton, qui met en évidence au XVIIe siècle la décomposition de la lumière en diverses couleurs grâce à un prisme (obtenant ainsi son spectre électromagnétique), de nombreux physiciens se penchent sur l'étude des spectres et élargissent ce champ de recherche.

C'est ainsi que les raies spectrales sont observées à partir du XVIIIe siècle : il s'agit de lignes sombres ou lumineuses occupant des positions déterminées dans les spectres électromagnétiques. On constate, par exemple, que la lumière émise par un sel de sodium chauffé passant à travers un prisme montre une unique raie jaune. Et on découvre bientôt que des raies à la disposition précise sont associées à différentes sortes de gaz.

Les physiciens comprennent que la disposition de ces raies est comme une empreinte digitale qui permet d'identifier les gaz. Mais l'aspect discontinu des spectres électromagnétiques montrant des raies les décontenance et la présence de ces dernières reste inexpliquée.

La physique quantique lève le voile

Lorsque Niels Bohr décide d'utiliser la notion de quanta pour développer un modèle décrivant la structure de l'atome, il apporte tout naturellement une explication à l'existence des raies spectrales, renforçant ainsi la validité de son modèle d'atome ainsi que de la physique quantique.

Selon lui, les électrons tournent autour du noyau sur des orbites bien précises sans émettre aucun rayonnement. Mais il arrive sous certaines conditions que ceux-ci changent d'orbite : dans ce cas, l'électron émet ou absorbe de l'énergie, selon qu'il se rende sur une orbite d'énergie inférieure ou supérieure à celle où il se trouvait. Cette énergie est émise ou absorbée sous la forme d'une particule de lumière, un photon auquel est associée une fréquence coïncidant avec les raies spectrales.

- Les raies d'émission correspondent au saut de l'électron vers une orbite d'énergie inférieure, ce qui a par exemple lieu quand un gaz chaud refroidit. Ces raies lumineuses sur le fond sombre du spectre sont produites par l'émission des photons dont la fréquence est reliée à la différence d'énergie entre les deux orbites.
- Les raies d'absorption correspondent au saut de l'électron vers une orbite d'énergie supérieure, comme lorsqu'un gaz froid est éclairé par une source lumineuse. Les raies sombres sur le fond lumineux du spectre continu se rapportent dans ce cas à l'absorption des photons.

Un outil incontournable de la physique moderne

L'étude et l'analyse des spectres électromagnétiques et des raies prennent le nom de « spectroscopie ». La spectroscopie est un formidable outil, notamment en astrophysique. La connaissance des objets célestes (étoiles, galaxies, planètes extérieures au système solaire, etc.) est avant tout accessible par la lumière qu'émettent ces mêmes objets.

La décomposition de la lumière émise par les astres grâce au spectroscope aide à y détecter des raies spectrales qui livrent des informations sur leur composition, mais aussi sur leurs mouvements : l'observation du décalage des raies spectrales par rapport aux raies observées en laboratoire indique s'ils s'éloignent ou se rapprochent de nous.

Les raies spectrales

L'essentiel en 5 secondes

- **La nature des raies présentes au sein des spectres électromagnétiques qui caractérisent les différents types de gaz reste une énigme pour les physiciens jusqu'à la fin du XIXe siècle.**
- **Le modèle de l'atome quantique explique le comment et le pourquoi de leur présence.**
- **L'étude des raies spectrales (la spectroscopie) est un formidable outil, notamment en astrophysique pour connaître la composition des étoiles.**

13

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Le tableau périodique des éléments, conçu au XIXe siècle de manière empirique, est remarquablement expliqué grâce aux apports de la physique quantique.

La classification des éléments

Si la notion d'atome n'est pas encore reconnue à cette époque par la communauté scientifique, il est cependant démontré par les observations et les expériences qu'un certain nombre d'éléments (hydrogène, oxygène, carbone, fer, or, etc.) constituent la nature et désignent, pour les savants, des substances simples que l'on ne peut décomposer en d'autres substances.

De nombreuses tentatives de classifications des éléments ont lieu, mais c'est au chimiste russe Dmitri Mendeleïev (1834-1907) que l'on attribue la construction du tableau périodique utilisé aujourd'hui. S'appuyant sur les propriétés chimiques des éléments alors connus, et remarquant que celles-ci se répètent suivant certains éléments (d'où la notion de périodicité), il conçoit le tableau qui figure désormais dans toutes les salles de classe de sciences.

Son tableau présente néanmoins un certain nombre de trous : Mendeleïev déduit que ces trous correspondent à des éléments encore non découverts dont il prédit, grâce à leur position dans le tableau, les propriétés.

Comme souvent en science, il est fascinant de constater comment les découvertes expérimentales ultérieures viennent confirmer les prédictions de théories pertinentes. La découverte des éléments prédits par Mendeleïev confirme la justesse de son tableau au regard de la communauté scientifique.

L'organisation du tableau au regard de la théorie quantique

En 1913, Niels Bohr modélise la structure de l'atome grâce aux quanta : les électrons qui tournent autour du noyau sont, selon lui, répartis sur des orbites (aussi appelées « couches électroniques ») et Bohr constate bientôt que la répartition des électrons sur ces différentes orbites correspond exactement à la répartition des éléments (qui sont aussi des atomes dont l'existence a été prouvée en 1905) dans la classification périodique.

LA PHYSIQUE RENCONTRE LA CHIMIE

En expliquant la position des éléments chimiques dans la classification périodique grâce à la physique, Niels Bohr relie la physique à la chimie, réalisant le rêve de nombreux scientifiques de l'époque.

- Le tableau range les éléments par nombre d'électrons croissants : sur une ligne, il suffit d'ajouter un électron à un élément pour passer à l'élément suivant. L'hydrogène possède 1 électron, l'hélium 2, le lithium 3, etc.
- Chaque couche électronique correspond à une ligne du tableau, aussi appelée « période ». Le nombre d'électrons par couche est déterminé par la formule « $2n^2$ » : n étant le numéro de la couche, jusqu'à 2 électrons peuvent se trouver sur la première, 8 sur la deuxième, 18 sur la troisième, etc. L'oxygène possède, par exemple, 8 électrons dont 2 se trouvent sur la première orbite, puis 6 sur la deuxième : celle-ci pouvant recevoir jusqu'à 8 électrons, elle n'est pas entièrement remplie, et peut notamment recevoir les 2 électrons de 2 atomes d'hydrogène pour former la molécule d'eau.
- Les propriétés chimiques et physiques des atomes sont liées au degré de remplissage des électrons dans la couche la plus externe. Les colonnes du tableau, appelées « groupes », présentent les éléments ayant un nombre identique d'électrons sur cette couche et dont les propriétés sont semblables. Le deuxième groupe

constitue, par exemple, la famille des métaux alcalino-terreux : leur couche externe ne comporte que 2 électrons ; ils sont alors chimiquement très réactifs et interagissent fortement avec d'autres atomes en échangeant des électrons pour former une molécule. Les éléments du dernier groupe forment la famille des gaz nobles, éléments très stables parce que leur couche électronique externe est pleine.

Le tableau périodique des éléments

L'essentiel en 5 secondes

- **Le tableau périodique des éléments, réalisé de manière empirique au XIXe siècle, classe les éléments selon leurs propriétés chimiques et physiques.**
- **La découverte de la structure de l'atome, dans le cadre de la physique quantique, éclaire la base de cette classification : le tableau reproduit l'arrangement des électrons sur les orbites des atomes.**
- **Les propriétés des éléments chimiques sont directement déterminées par leur structure électronique.**

14

LES NOMBRES QUANTIQUES

Dans le modèle de l'atome quantique, l'état d'un électron est défini par ce que les physiciens appellent des « nombres quantiques ».

Au nombre de quatre

Pour le physicien Niels Bohr, qui développa le premier modèle d'atome quantique, les électrons tournent sur des orbites autour du noyau. Lorsqu'ils passent d'une orbite à l'autre, ils émettent ou absorbent de l'énergie, donnant lieu aux raies spectrales observées avec la méthode de la spectroscopie. Bohr numérote les différentes orbites dans l'atome à l'aide de ce qu'on appelle le « nombre quantique principal », désigné par la lettre *n*.

En menant cependant des analyses spectrales plus poussées, notamment sous l'action d'un champ électromagnétique, les scientifiques détectent de nouvelles raies. Pour les expliquer, ils redéfinissent la notion d'« orbite », lui donnant la possibilité de prendre d'autres formes et d'autres directions, et déterminent deux nouveaux nombres quantiques pour décrire l'état de l'électron : *k*, le nombre quantique azimutal, et *m*, le nombre quantique magnétique.

La découverte d'autres raies amène enfin les physiciens à faire l'hypothèse que l'électron, en plus de tourner autour du noyau, tourne aussi sur lui-même. Ils introduisent alors un quatrième nombre quantique qui caractérise son orientation : c'est le nombre quantique de spin, *s*.

Les développements de la physique quantique verront par la suite l'abandon de la notion d'orbite. On considère maintenant que les électrons se trouvent dans certains états particuliers caractérisés par leur énergie, mais on ne leur associe plus de trajectoire définie au sein de l'atome. Un saut quantique, le passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre avec émission ou absorption d'un photon, est un événement non visualisable. Et le spin devient une caractéristique intrinsèque de l'électron (au même titre que la masse ou la charge).

Les quatre nombres quantiques décrivent les états de chacun des électrons dans n'importe quel atome en obéissant néanmoins à une dernière contrainte : le principe d'exclusion de Pauli.

Le principe d'exclusion

Pour expliquer pourquoi tous les électrons ne se réfugient pas sur l'orbite la plus proche du noyau qui possède l'énergie la plus basse, le physicien allemand Wolfgang Pauli (1900-1958) fait l'hypothèse que, dans un atome, il ne peut exister deux électrons aux caractéristiques quantiques identiques : deux électrons dans un même atome ne peuvent avoir les mêmes nombres quantiques. Par ce principe d'exclusion, les électrons peuvent se répartir harmonieusement entre tous les états énergétiques possibles dans l'atome.

Entre les valeurs que peuvent prendre les quatre nombres quantiques et le principe d'exclusion, la disposition des électrons dans n'importe quel atome est alors bien comprise.

LA CONSTRUCTION DU TABLEAU PÉRIODIQUE

Grâce à la connaissance des quatre nombres quantiques et au principe d'exclusion, il est possible de reconstruire tout le tableau périodique des éléments. Encore une preuve de l'efficacité de la théorie quantique !

Les nombres quantiques

L'essentiel en 5 secondes

- » **L'état d'un électron dans un atome est défini par quatre nombres quantiques appelés** n, k, m **et** s**.**
- » **Le principe d'exclusion stipule qu'un électron dans un atome ne peut avoir les quatre mêmes nombres quantiques.**
- » **Les nombres quantiques, associés au principe d'exclusion, aident à décrire la disposition de tous les électrons d'un atome.**

15

L'EXPÉRIENCE DES DEUX FENTES

Selon le physicien américain Richard Feynman (1918-1988), l'expérience des deux fentes résume à elle seule la quintessence de l'étrangeté quantique.

Les fentes de Young

Dans un plan opaque, deux petits trous percés (les fentes) entraînent l'obtention, à partir d'une même source de lumière, de deux faisceaux lumineux. De l'autre côté du plan, ces faisceaux interfèrent et produisent sur un écran une figure d'interférence, c'est-à-dire une série de franges alternativement sombres et lumineuses.

Pour mieux saisir l'expérience, imaginons que les ondes lumineuses soient des vagues rencontrant le plan opaque. En passant à travers les fentes, la série de vagues se sépare en deux séries qui interfèrent de l'autre côté du plan :

- Lorsque les crêtes des vagues se rencontrent, elles s'additionnent, ce qui correspond aux franges lumineuses de l'expérience de Young.
- En revanche, lorsqu'un creux rencontre une crête, ils s'annulent, ce qui correspond aux franges sombres.

Cette expérience, menée par le physicien britannique Gustav Young en 1801, prouve la nature ondulatoire de la lumière. Mais, lorsque les physiciens démontrent au début du XXe siècle la nature corpusculaire de cette dernière, lors de son interaction avec la matière, l'expérience des fentes de Young est reprise sous une forme modifiée pour explorer la contradiction de la nature duale de la lumière.

Deux fentes face à l'étrangeté quantique

Des physiciens décident de faire passer un à un des photons par les fentes, en plaçant de l'autre côté du plan opaque du papier photographique. Ils détectent, dans un premier temps, de petites tâches lumineuses localisées qui mettent en évidence le caractère corpusculaire de la lumière. Mais après qu'un très grand nombre de photons est passé au travers des deux fentes, la figure d'interférence apparaît peu à peu : les impacts lumineux se positionnent au fur et à mesure en franges lumineuses et sombres.

Si les photons en solitaire se comportent comme des corpuscules, ils adoptent cependant le comportement des ondes lorsqu'ils se retrouvent en masse, et la physique classique, avec ses outils, est incapable de décrire ce phénomène.

Cette expérience sera par la suite conduite avec d'autres objets quantiques (comme les électrons ou les protons), fournissant toujours ce même résultat paradoxal.

Matière à penser

Après cette expérience, les physiciens durent abandonner les concepts classiques : ni le modèle ondulatoire, ni le modèle corpusculaire de la lumière issus de la physique classique ne sont en mesure de décrire avec exhaustivité les résultats de l'expérience des deux fentes.

Pour appréhender ces résultats, la nouvelle physique quantique a su dépasser les approches classiques d'ondes et de corpuscules, trop simplistes et insuffisantes : les objets quantiques ne sont ni l'un ni l'autre, ils sont autre chose.

On considère aujourd’hui que la lumière est constituée de photons qui adoptent statistiquement le comportement d’une onde. Cette interprétation est applicable à tous les objets quantiques.

L’expérience des deux fentes

L’essentiel en 5 secondes

» **L’expérience des fentes de Young montre le caractère ondulatoire de la lumière.**

» **Des photons envoyés un à un vers les deux fentes semblent d’abord se comporter comme des corpuscules, mais lorsqu’ils deviennent très nombreux, ils se comportent comme des ondes.**

» **Pour décrire ce phénomène, la physique quantique dépasse les images classiques d’ondes et de corpuscules : selon elle, la lumière est faite de photons dont le comportement est statistiquement celui d’une onde.**

16

LA BANDE À BOHR

Le rôle du physicien danois Niels Bohr (1885-1962) dans le développement de la physique quantique est prépondérant, notamment grâce à l'institut qu'il fonde à Copenhague, et qui attire et réunit les meilleurs chercheurs d'Europe autour de cette nouvelle physique.

Niels Bohr

Très intéressé par le concept d'atome, Niels Bohr part, après son doctorat, travailler auprès du professeur anglais Jean-Joseph Thomson, pour lequel l'atome est une sphère de charge positive dans laquelle sont plongés les électrons. Peu satisfait de cette rencontre, Bohr fait bientôt la connaissance du physicien anglais Ernest Rutherford, qu'il rejoint à Manchester. S'inspirant alors du modèle atomique de ce dernier (représentant l'atome comme un système solaire) et des récentes découvertes de la physique quantique, il dévoile en 1913 son propre modèle d'atome.

Le travail de Niels Bohr est vite plébiscité, entre autres grâce à son modèle d'atome quantique qui résout nombre d'inconnues. En 1916, il est nommé professeur de physique théorique à l'université de Copenhague. En 1922, il obtiendra même le prix Nobel de physique.

L'institut de Copenhague

L'ambiance conviviale qui règne au laboratoire de Rutherford, marquée par de nombreuses discussions et une grande liberté d'expression en la présence bienveillante et attentive du professeur, inspire beaucoup Niels Bohr.

Grâce à sa réputation grandissante, il fonde en 1920 un institut de physique théorique à Copenhague, dont il devient le directeur. Selon son souhait, il y instille une ambiance de travail studieuse mais décontractée et s'entoure de chercheurs joyeux qui œuvrent à leur rythme, grasses matinées, matchs de football (Bohr est un excellent joueur) et sorties cinéma faisant partie intégrante du quotidien.

L'institut de Bohr est rapidement un centre mondial pour le développement de la physique quantique. Havre de créativité, il attire les plus brillants physiciens du monde entier, jeunes théoriciens passionnés, dont les plus célèbres sont Werner Heisenberg et Wolfgang Pauli.

Niels Bohr fournit un effort constant pour faire avancer la physique quantique et organise au sein de l'institut de nombreux stages, colloques et séminaires où se retrouvent des chercheurs de tous pays pour discuter les dernières avancées.

Bohr face à Einstein

C'est à l'institut de Bohr qu'est définie l'interprétation de Copenhague, une manière d'appréhender et de comprendre la physique quantique. Le rapport qu'elle livre à la réalité va initier un débat légendaire entre Niels Bohr et « sa bande » d'un côté, et Albert Einstein de l'autre. Ce dernier s'oppose effectivement à l'interprétation de Copenhague : pour lui, la physique quantique est une théorie incomplète car elle n'est pas en mesure de dresser un portrait complet du monde réel.

Einstein passera une grande partie de sa vie à mettre au point des expériences de pensée qu'il soumettra à Bohr pour démontrer cette incomplétude. Plutôt que d'affaiblir la théorie

quantique, les objections d’Einstein incitent Bohr et sa bande à clarifier et renforcer leurs idées. Et, malgré leurs divergences, l’amitié entre les deux hommes durera toute leur vie.

DIEU ET LES DÉS

Lors d’un échange devenu célèbre à propos de la réalité en physique quantique, Einstein dit à Bohr : « Dieu ne joue pas aux dés », ce à quoi Bohr répondit : « Qui êtes-vous, Einstein, pour dire à Dieu ce qu’il doit faire ? »

La bande à Bohr

L’essentiel en 5 secondes

- **Le rôle du physicien danois Niels Bohr dans le développement de la physique quantique est prépondérant.**
- **Le passage par l’institut de physique théorique qu’il créa à Copenhague devint incontournable pour tout chercheur en physique quantique.**
- **Le débat entre Bohr et Einstein au sujet de la physique quantique fut source d’une intense et constructive réflexion.**

17

LE PRINCIPE D'INCERTITUDE

Nommé aussi plus justement « principe d'indétermination », et formulé par le physicien allemand Werner Heisenberg (1901-1976), ce principe est un des symboles de la nouvelle pensée introduite par la physique quantique. Heisenberg obtiendra d'ailleurs le prix Nobel en 1932.

Position ou vitesse

Werner Heisenberg est un pur physicien théoricien. Un temps collaborateur de Niels Bohr à l'institut de Copenhague, il fait partie du groupe de jeunes chercheurs qui révolutionnent la pensée scientifique au début du XXe siècle.

Pour Heisenberg, on ne peut considérer les atomes et leurs constituants comme des objets physiques, et seules les mathématiques sont aptes à les décrire. C'est sur l'île d'Heligoland dans la mer du Nord (qui deviendra célèbre dans l'histoire de la physique), où il se réfugie à cause de problèmes de santé, qu'il développe le premier formalisme mathématique décrivant le monde de l'infiniment petit sur la base de matrices.

Si son travail est très abstrait, ses résultats sont concluants et ouvrent sur une conséquence inattendue : la découverte du principe d'incertitude, qui dit que dans le monde de l'infiniment petit, il est impossible de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule.

Lorsque, dans la nuit, les milliards de photons d'une lampe se réfléchissent sur les objets et les rendent visibles, ils n'ont cependant aucun impact sur eux. Il en va autrement dans le monde microscopique : la masse d'une particule est si petite que le choc d'un seul photon sur elle la déplace immédiatement. Chercher à voir une particule (par une mesure) la dérange donc inévitablement : de manière générale, en physique quantique, le processus de la mesure perturbe le système étudié. Cette perturbation entraîne alors l'impossibilité de connaître précisément et dans le même temps la position et la vitesse d'une particule : plus grande est la précision sur sa position, plus grande est l'indétermination sur sa vitesse.

Une particule n'a pas de trajectoire

L'indétermination sur la mesure du couple de caractéristiques position-vitesse d'une particule entraîne l'impossibilité de saisir sa trajectoire, dont le calcul requiert une connaissance précise à tout instant, et de la position, et de la vitesse de l'objet. La notion de trajectoire n'a donc plus de sens dans le monde quantique. Cette conclusion, tirée du principe d'indétermination, marque la rupture entre les physiques classique et quantique.

Dans le monde quantique, la position d'une particule ne peut être déterminée que par des calculs probabilistes : la notion de trajectoire est remplacée par la probabilité de présence d'une particule dans un volume spatial donné.

TEMPS ET ÉNERGIE

Le principe d'incertitude s'applique aussi à d'autres couples de caractéristiques, comme l'énergie et le temps.

L'introduction de l'indéterminé en science

Le principe de Heisenberg est une révolution philosophique : avec lui, le déterminisme à la base de la physique classique ne peut plus exister. La description déterministe du monde macroscopique n'est en effet plus valable dans le monde de l'infiniment petit.

L'impossibilité de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule n'est par ailleurs pas due à l'imperfection du dispositif expérimental. C'est une restriction imposée par la théorie et, selon Heisenberg même, par la nature.

Évoquer enfin la connaissance simultanée de la position et de la vitesse d'une particule quantique présuppose que toute particule serait un corpuscule et sous-entend qu'il existerait une position et une vitesse exactes de la particule que nous serions incapables de connaître simultanément. Les particules ne sont pourtant pas des corpuscules au sens classique. Pour les décrire, il faut donc changer de langage. On pourrait plutôt dire que, selon le principe de Heisenberg, les particules ne possèdent jamais ces deux caractéristiques simultanément.

Le principe d'incertitude

L'essentiel en 5 secondes

- **Selon le principe d'incertitude, il est impossible de connaître simultanément la vitesse et la position d'une particule.**
- **Dans le monde de l'infiniment petit, la notion de trajectoire est remplacée par une probabilité de présence de l'objet quantique.**
- **Le principe de Heisenberg au cœur de la physique quantique marque une rupture avec la physique classique en introduisant l'indétermination en science.**

18

LES ONDES DE MATIÈRE

La notion d'« onde de matière », introduite par Louis de Broglie dans les années 1920, marque le développement de la nouvelle physique quantique qui remplace la théorie des quanta pour décrire le monde de l'infiniment petit.

Fou ou génial ?

En 1924, dans sa thèse de doctorat, le physicien français Louis de Broglie (1892-1987) ose deux hypothèses déconcertantes :

- Comme Einstein a introduit la dualité onde-corpuscule de la lumière, de Broglie étend cette dualité à toutes les particules : selon lui, une particule (électron, proton, etc.) est à la fois onde et corpuscule.
- À l'instar des ondes électromagnétiques qui sont associées aux particules de lumière (les photons), de Broglie relie aux particules de matière un autre type d'ondes qu'il appelle « ondes de matière ».

En découvrant cette thèse, le jury se demande s'il a affaire à un fou ou à un génie, et se tourne vers Einstein pour solliciter son avis. Ce dernier, émerveillé, dira que de Broglie a levé une partie du voile.

Des paquets d'ondes

Pour de Broglie, l'électron dans l'atome n'est plus une simple particule, mais une onde circulaire fermée qui vibre à une fréquence déterminée correspondant à un certain niveau d'énergie. Ces niveaux d'énergie, dont seulement certains sont permis, remplacent la notion d'orbite de l'atome quantique de Bohr, et le passage d'un niveau à un autre a lieu par la modification de la fréquence de l'onde.

En musique, un son est composé d'un son fondamental doté d'une fréquence déterminée et d'harmoniques : un son est donc une superposition d'ondes. De même, de Broglie explique que l'onde de matière associée à une particule est un ensemble d'ondes superposées, qu'il appelle « paquet d'ondes ». On peut se représenter ce paquet d'ondes comme « guidant » la particule dans son déplacement.

En 1927, le caractère ondulatoire de l'électron (et bientôt celui d'autres particules) est démontré de manière expérimentale, confirmant les hypothèses de Louis de Broglie. L'aspect ondulatoire de la matière ne peut cependant être observable que dans le monde de l'infiniment petit.

L'équation de Schrödinger

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger (1887-1961), enthousiasmé par le travail de Louis de Broglie, recherche un cadre mathématique pour décrire les ondes de matière, notamment celles associées aux électrons dans les atomes. Il les représente par ce que l'on nomme une « fonction d'onde » (qui reflète le mouvement des électrons) et met celle-ci en équation.

SCHRÖDINGER ET LES FEMMES

Erwin Schrödinger aime les femmes : elles l'inspirent. Dans son journal intime, il raconte comment il a finalisé son équation après une nuit particulièrement agitée passée avec une maîtresse pendant les fêtes de fin d'année 1925.

Avec son équation d'onde, Schrödinger fournit un cadre mathématique pour la physique quantique : celui de la mécanique ondulatoire. Le physicien Werner Heisenberg a lui-même pourvu un tel cadre. Mais la mécanique matricielle qu'il a développée, fondée sur les probabilités, est abstraite et élimine la notion d'image en physique quantique. Les physiciens lui préfèrent alors généralement à cette époque l'équation de Schrödinger, pour qui le monde physique est exclusivement composé de phénomènes ondulatoires et déterministes.

Les ondes de matière

L'essentiel en 5 secondes

- **De Broglie étend le caractère dual onde-corpuscule de la lumière à toutes les particules et leurs associe pour cela une onde de matière.**
- **L'électron dans l'atome n'est plus une simple particule sur une orbite, mais une onde dont la vibration, à une fréquence déterminée, correspond à un certain niveau d'énergie.**
- **À partir des hypothèses de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger développe un cadre mathématique pour décrire le monde de l'infiniment petit : la mécanique ondulatoire.**

19

LE CHAT

DE SCHRÖDINGER

Ce chat, qui aurait tout aussi bien pu être un autre animal, est le protagoniste d'une expérience de pensée devenue célèbre pour montrer l'absurdité – selon le physicien Erwin Schrödinger – de la physique quantique.

Des probabilités et des superpositions

Selon Schrödinger, le monde est uniquement composé de phénomènes ondulatoires. La fonction d'onde de son équation représente l'onde de matière associée à l'électron dans l'atome par de Broglie. Cependant, tout le monde ne partage pas cette opinion.

Le physicien allemand Max Born (1882-1970), notamment, considère que la fonction d'onde est un objet mathématique aidant à calculer la probabilité de présence d'une particule dans un très petit volume. Son interprétation de la fonction d'onde est statistique : il n'est pas possible de prédire exactement la position où sera observée la particule.

Dans cette description probabiliste du monde de l'infiniment petit, la particule étudiée n'est alors plus représentée par une onde de matière (qui est aussi un paquet d'ondes), mais par un certain nombre d'états superposés dont seule la mesure peut déterminer l'un d'eux : on appelle cela la « réduction du paquet d'ondes ». Tant qu'aucune mesure ou observation n'a été faite, un système microscopique superpose donc différents états quantiques.

Une expérience de pensée

Schrödinger, comme Einstein d'ailleurs, n'adhère pas à l'interprétation de Born. Pour lui, la réalité du monde est déterminée, et il ne croit pas que la nature puisse être subordonnée à des calculs probabilistes. Afin de dénoncer ces incohérences, il présente en 1935 une expérience de pensée devenue célèbre sous le nom de « chat de Schrödinger ».

Il imagine un dispositif pour le moins diabolique : un chat vivant est enfermé dans une boîte contenant un atome radioactif pouvant, avec la même probabilité, se désintégrer ou non au bout d'une heure. S'il se désintègre, un marteau est actionné qui brise un flacon de verre contenant un gaz mortel qui tuera le chat.

L'expérience illustre la superposition d'états quantiques. Au bout d'une heure, tant qu'aucune observation n'a été faite du contenu de la boîte, l'interprétation probabiliste de Born dit que le chat est à la fois dans un état mort et dans un état vivant, cette superposition étant, selon Schrödinger, complètement absurde.

La nouvelle quantique

En associant des ondes de matière aux particules, Louis de Broglie fut l'initiateur d'une nouvelle physique quantique, s'émancipant totalement de la physique classique.

Si Schrödinger donna dans un premier temps un cadre mathématique au travail de Louis de Broglie en considérant que le monde de l'infiniment petit était fait d'ondes bien déterminées, il fut cependant bientôt démontré que sa mécanique ondulatoire était équivalente à un cadre mathématique plus abstrait, reposant sur les probabilités : la mécanique matricielle de Heisenberg. Cela apporta alors la preuve que, contre l'avis de Schrödinger, l'interprétation statistique de la fonction d'onde par Born était juste et les états superposés possibles. À partir de là, la physique quantique se trouva en rupture nette avec le déterminisme classique.

Les états superposés, illustrés par l'expérience de pensée de Schrödinger, rendent compte de phénomènes du monde quantique, comme les liaisons chimiques : un électron peut être dans deux endroits à la fois.

De manière générale, les lois de la nouvelle physique quantique impliquent l'existence de ces états superposés : un objet quantique peut être dans deux états à la fois. Ce phénomène ne s'observe néanmoins que dans le monde de l'infiniment petit, ce dernier étant par ailleurs si éloigné de notre monde familier que l'on ne peut prétendre le décrire selon nos concepts habituels.

Le chat de Schrödinger

L'essentiel en 5 secondes

- **Dans les années 1920, la nouvelle physique quantique introduit les probabilités et la possibilité d'états superposés dans le monde de l'infiniment petit.**
- **Erwin Schrödinger illustre l'absurdité de ces interprétations par une expérience de pensée dont la victime est un chat.**
- **Aujourd'hui, les physiciens font une nette distinction entre les phénomènes du monde quantique et ceux du monde macroscopique : l'un étant si éloigné de l'autre, on ne peut prétendre les décrire avec les mêmes concepts.**

20

L'ÉQUATION DE DIRAC

L'équation formulée par le physicien anglais Paul Dirac (1902-1984) conduisit à la découverte d'un concept qui fit couler beaucoup d'encre, autant en science qu'en fiction : l'antimatière.

La vitesse de la lumière en physique quantique

Dans les années 1920, un cadre mathématique vient d'être élaboré en physique quantique pour décrire le comportement des particules. La physique quantique n'est cependant pas seule à révolutionner la science et la pensée : la relativité d'Einstein fait de même, décrivant une tout autre réalité, la relativité restreinte proposant un rapport différent à l'espace et au temps en fonction de la vitesse de la lumière, et la relativité générale décrivant le monde de l'infiniment grand.

Or, la physique quantique ne sait pas tenir compte des découvertes de la relativité : les équations décrivent par exemple très bien le comportement de l'électron, à l'unique condition que sa vitesse ne soit pas trop élevée. Mais quand sa vitesse s'approche de celle de la lumière, il faudrait prendre en considération les effets relativistes, la déformation de l'espace et du temps.

Paul Dirac, fasciné par cette problématique, se met à chercher une équation qui décrirait le comportement de l'électron en toute circonstance, quelle que soit sa vitesse, qui prendrait donc en considération les effets quantiques et relativistes. En 1927, ce personnage ascétique se plonge en solitaire dans une année de travail intense, au terme de laquelle il trouve l'équation recherchée, celle qui réunit les théories de la relativité restreinte et de la physique quantique (la réunion de la relativité générale et de la physique quantique occupe encore les physiciens aujourd'hui).

Drôle de découverte

Dans les semaines qui suivent, il réussit même à résoudre son équation qui présente quatre solutions. Si deux des solutions concernent l'électron, les deux autres semblent décrire un objet à énergie négative, faisant allusion à une particule qui se comporterait à l'exact opposé de l'électron. La publication de ses résultats est mal accueillie dans le monde de la physique mais, pour Paul Dirac, le critère esthétique est plus important que tout le reste : si son équation est belle, c'est donc qu'elle doit décrire la réalité. Encore faut-il comprendre le message qu'elle exprime.

En 1931, il énonce avec audace que les deux solutions de son équation à énergie négative décrivent une nouvelle particule dotée de la même masse que l'électron, mais d'une charge électrique opposée. Il prédit l'existence d'une particule qu'il nomme « positron », l'antiparticule de l'électron.

UNE ÉQUATION SAVANTE

On raconte que, revenant sur sa découverte, Paul Dirac aurait dit : « Mon équation est bien plus savante que moi. »

La preuve

La communauté scientifique attend des preuves. Elles seront apportées par un jeune étudiant américain – ignorant du reste les prédictions théoriques de Paul Dirac – qui accumule des traces de rayons cosmiques sur des plaques photographiques du haut des montagnes. Sur ses photos, certaines traces sont déposées par les électrons, mais d'autres sont laissées par des particules déviées à l'opposé de l'électron : cela signifie qu'elles ont une charge opposée à ce dernier, donc positive.

Cette découverte est bientôt confirmée par d'autres équipes de scientifiques. En 1933, l'année même de la découverte expérimentale du positron, première particule d'antimatière identifiée, Dirac se voit attribuer le prix Nobel de physique.

L'équation de Dirac

L'essentiel en 5 secondes

- **Quand une particule se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière, il faut prendre en compte, pour décrire son comportement, les effets décrits par la relativité, ce que la physique quantique ne sait pas faire.**
- **Paul Dirac réussit à formuler une équation à la fois quantique et relativiste pour décrire le comportement de l'électron.**
- **L'équation de Dirac réserve une surprise de taille : elle prédit l'existence de l'antiparticule de l'électron, le positron.**

21

L'ANTIMATIÈRE

Il existe une autre forme de matière que celle qui constitue notre monde : c'est l'antimatière, dont les antiparticules sont des objets quantiques au même titre que les particules.

Dans l'Univers primordial

L'Univers, au tout début de son histoire, est constitué à parts égales de matière et d'antimatière. Des fluctuations de l'énergie du vide, les particules naissent toujours par paires : une particule de matière et une antiparticule d'antimatière. La particule d'antimatière (l'antiparticule) ressemble comme deux gouttes d'eau à la particule de matière, à une différence près : sa charge électrique (l'une des propriétés fondamentales des particules) est opposée. Quand une particule possède une charge négative, son antiparticule possède une charge positive.

Parmi les antiparticules de l'Univers primordial, il y a les positrons (les antiparticules des électrons), les antiquarks et les antineutrinos. À cette époque, il y a autant de quarks que d'antiquarks. Autant d'électrons que de positrons. La matière et l'antimatière sont symétriques.

Les particules et les antiparticules ont la spécificité de s'annihiler pour redevenir énergie lorsqu'elles se rencontrent. Dans l'Univers primordial, des particules et des antiparticules apparaissent sans cesse par paires, pour aussitôt s'annihiler et redevenir énergie.

NOMENCLATURE

Les physiciens nomment « matière » les particules qui constituent notre monde et « antimatière » les particules opposées. Mais ce n'est qu'une question de nomenclature. L'appellation inversée serait aussi possible.

La disparition de l'antimatière

Si l'antimatière se partageait l'Univers à égalité avec la matière dans son passé lointain, elle est cependant devenue extrêmement rare. Les physiciens savent la recréer dans leurs laboratoires et l'observent aussi dans les rayons cosmiques. Pour autant, tous les objets de notre monde sont constitués de matière. La question de savoir comment la matière a pris le dessus sur l'antimatière demeure une énigme pour la science.

Une hypothèse dit qu'il y avait dans l'Univers primordial un léger excédent de matière sur l'antimatière. L'expansion de l'Univers a entraîné la baisse de sa température et de sa densité. Lorsque la température passa sous un certain seuil, la création de paires de particules et d'antiparticules à partir de l'énergie du vide ne fut plus possible. Ces dernières continuèrent cependant à s'annihiler, ce qui aurait engendré une annihilation de masse de la matière et de l'antimatière. Après cela, toute l'antimatière aurait disparu, ainsi qu'une grande partie de la matière, sauf cet excédent qui constituerait aujourd'hui notre monde.

L’antimatière

L’essentiel en 5 secondes

- **À toute particule est associée une antiparticule qui s’en différencie seulement par sa charge électrique opposée.**
- **Particules et antiparticules naissent par paire de l’énergie du vide et ont la propriété de s’annihiler pour redevenir énergie lorsqu’elles se rencontrent.**
- **Dans l’Univers primordial, il y avait pratiquement autant de matière que d’antimatière. Mais il y aurait eu une annihilation de masse dont ne réchappa qu’un léger excédent de matière qui constitue notre monde aujourd’hui.**

22

LAMESURE

QUANTIQUE

Pour comprendre le monde, le scientifique appréhende ses sujets d'étude en les mesurant puis en chiffrant leurs caractéristiques, afin de pouvoir en dresser le portrait.

Dans le monde classique

Le physicien qui étudie le monde qui nous entoure, celui des objets à notre échelle, peut mesurer les caractéristiques de ces derniers de manière objective, en tant qu'observateur extérieur.

S'il analyse, par exemple, la trajectoire d'une balle avec une série de mesures, il pourra définir sa position, sa vitesse, sans pour autant en modifier les données : l'observation de la balle ne change pas sa vitesse ou sa trajectoire. L'opération de mesure reste neutre, ne modifie pas les propriétés du sujet étudié.

Dans le monde quantique

L'acte de mesure dans le monde quantique influence en revanche profondément le système étudié.

- La célèbre expérience des deux fentes, dans laquelle un faisceau de particules (photon, électron, etc.) est séparé en deux en passant par deux trous, prouve le caractère ondulatoire de la matière par la formation d'une figure d'interférence sur un écran de l'autre côté des deux fentes. Les particules étant aussi des corpuscules, les physiciens ont alors voulu savoir par quelle fente chacune d'elles passaient et firent un constat étonnant : cette expérience brouille la figure d'interférence, comme si les particules étaient « dérangées » par la mesure, et que, la question posée étant d'ordre corpusculaire, elles répondaient selon leur nature corpusculaire et non ondulatoire, d'où la disparition des interférences.
- La physique quantique représente d'autre part une particule par un paquet d'ondes superposées, équivalent à la superposition d'un certain nombre d'états quantiques (comme par exemple l'ensemble des positions possibles d'une particule). Lors de la mesure, une onde unique est choisie, un seul état est sélectionné, indiquant avec une certaine probabilité la position de la particule. La sélection d'une seule onde par la mesure est appelée la « réduction du paquet d'ondes ».

Ces deux exemples montrent qu'en physique quantique, les actes de mesure pour connaître le monde de l'infiniment petit modifient – et donc perturbent – l'objet étudié. Ce constat entraîne nombre de considérations philosophiques qui alimentent un débat toujours présent dans la communauté scientifique.

Introduction au débat

Si la mesure perturbe l'objet quantique (comme une particule), il est ainsi impossible de connaître son état avant la mesure : les particules sont-elles alors des « choses » en soi, peut-on leur attribuer une réalité physique autonome en dehors de l'observation ? Quel sens cela a-t-il de parler des propriétés d'un objet quantique tant qu'aucune mesure n'a été effectuée sur lui ?

L'idée qu'un objet quantique posséderait une infinité d'état superposés quand il n'est pas perturbé par une mesure peut sembler absurde – le physicien Erwin Schrödinger chercha à le démontrer par son expérience avec un chat qui serait à la fois mort et vivant en dehors de toute observation. Cette absurdité serait la preuve que la physique quantique est une théorie non encore aboutie, car pas encore capable de décrire la réalité indépendamment de l'observateur.

Pour d'autres physiciens, ces absurdités n'ont pas d'importance : la validité de la physique quantique est prouvée par le fait que ses prévisions soient validées par l'expérience. Et, selon eux, la physique quantique ne décrirait pas la réalité en elle-même, mais ce que nous pouvons connaître sur elle par l'expérience.

La mesure quantique

L'essentiel en 5 secondes

- **Nous pouvons connaître de manière objective le monde qui nous entoure en le mesurant.**
- **L'acte de mesure dans le monde quantique perturbe, en revanche, le système étudié.**
- **Ce constat questionne sur la réalité physique des objets quantiques en dehors de la mesure.**

23

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE

À cause de l'étrangeté du comportement de ses objets, la physique quantique, au contraire de la physique classique, a besoin d'être interprétée. L'interprétation qui rallie la plupart des physiciens, même si elle a aujourd'hui évolué, porte le nom de Copenhague où se trouve, dans les années 1920, l'institut de Niels Bohr, lieu de passage incontournable pour tout physicien quantique.

Les bizarreries du monde quantique

Parmi elles, on répertorie notamment :

» La nécessaire quantification du monde quantique pour pouvoir décrire ce dernier (quanta d'énergie et lumineux, niveaux d'énergie dans les atomes) ;

» La dualité onde-corpuscule de la lumière, ainsi que de toutes les particules ;

» Le principe de superposition, postulant que les objets quantiques peuvent être dans plusieurs états à la fois ;

» L'intervention des probabilités pour décrire les phénomènes à l'échelle microscopique, et l'indéterminisme qui y règne – montré par le principe de Heisenberg (on ne peut par exemple connaître précisément et simultanément la vitesse et la position d'une particule).

Face aux comportements étranges des objets quantiques, une interprétation est donc nécessaire, car la logique qui règne dans le monde de l'infiniment petit n'est définitivement pas celle qui nous sert à appréhender le monde à notre échelle.

À Copenhague

Au sein de l'institut de physique de Copenhague, le sens à donner aux étrangetés du monde quantique est vivement discuté autour de Niels Bohr et, en 1927, l'interprétation de Copenhague est prête.

Pour résoudre le paradoxe de la dualité onde-corpuscule, Bohr énonce le principe de complémentarité : les aspects corpusculaires et ondulatoires sont les représentations complémentaires d'une même réalité, et un objet quantique ne peut se montrer que sous un seul de ces deux aspects à la fois, selon les conditions de l'expérience. Ce n'est qu'au moment de la mesure que la particule dévoile certaines de ses caractéristiques physiques.

YIN ET YANG EN PHYSIQUE QUANTIQUE

Le principe de complémentarité est très important pour Niels Bohr, à tel point qu'il intégrera sur son blason le symbole du yin et du yang avec la devise : « *Contraria sunt complementa.* »

Pour les tenants de l'interprétation de Copenhague, le cadre conceptuel de la physique classique n'est pas utilisable pour décrire le monde de l'infiniment petit. Si en physique classique, l'objet mesuré est totalement séparé de l'appareil de mesure, la perturbation engendrée par ce dernier avec les objets quantiques ne peut pas être négligée. Les physiciens de Copenhague considèrent également que parler d'objets en dehors de toute mesure n'a pas de sens, comme parler de l'évolution d'un système entre deux mesures.

Pour eux, la physique quantique ne décrit pas la réalité en elle-même, mais seulement ce que nous pouvons en connaître. Ils considèrent d'ailleurs qu'une théorie ne doit pas correspondre à la réalité, mais doit prévoir correctement le résultat d'une expérience.

Enfin, selon eux, les objets quantiques forment plutôt un monde de potentialités ou de possibilités, plutôt que des choses et des faits.

L'opposition

L'interprétation de Copenhague est présentée au monde des physiciens européens lors du congrès Solvay de 1927, qui réunit les meilleurs savants de l'époque. Elle déclenche tout de suite une forte controverse : défendue par Bohr (avec notamment Heisenberg et Born), elle est attaquée par Planck, de Broglie et Schrödinger, avec Einstein à leur tête.

Cette interprétation sera par la suite l'objet d'un débat entre Bohr et Einstein qui durera toute leur vie. Aux yeux d'Einstein, la science se doit de décrire la réalité, elle doit être déterministe, et les bizarreries de la physique quantique ne sont dues qu'à l'incomplétude de la théorie.

L'interprétation de Copenhague

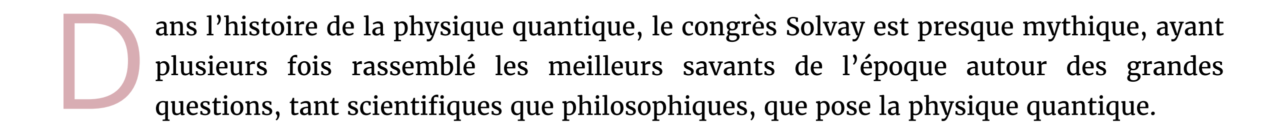
L'essentiel en 5 secondes

- **L'étrangeté du monde quantique requiert d'être interprétée, au contraire du monde macroscopique qui peut être appréhendé sans ambiguïté.**
- **Le fond de l'interprétation de Copenhague repose notamment sur le rapport à la réalité : la physique quantique ne décrit pas la réalité, mais ce que nous pouvons en connaître.**
- **Cette interprétation est vivement critiquée à l'époque, notamment par Einstein, pour qui la science doit décrire la réalité.**

24

LE CONGRÈS

SOLVAY



Dans l'histoire de la physique quantique, le congrès Solvay est presque mythique, ayant plusieurs fois rassemblé les meilleurs savants de l'époque autour des grandes questions, tant scientifiques que philosophiques, que pose la physique quantique.

Historique

Organisé par Ernest Solvay, chimiste et industriel belge passionné par les sciences et grand mécène de la recherche scientifique du début du XXe siècle, le congrès Solvay (qui débute en 1911) a lieu tous les 3 ans. Pendant une semaine à Bruxelles, les savants débattent de l'actualité scientifique, donnant lieu à d'importantes avancées, notamment en physique quantique.

Le premier congrès de 1911 réunit ainsi 11 prix Nobel, dont Marie Curie (qui fut longtemps la seule femme à y participer), Albert Einstein ou encore Max Planck. Son thème : « La théorie du rayonnement et les quanta. » Le congrès de 1933 introduit quant à lui le neutron, constituant du noyau atomique, dans la communauté scientifique. Mais le plus célèbre de tous les congrès est sans aucun doute celui de 1927.

Le congrès de 1927

Cinquième congrès Solvay, il est intitulé « Électrons et photons » et porte avant tout sur la physique quantique. Sur les 29 scientifiques présents, 17 sont ou vont devenir lauréats du prix Nobel. Parmi eux : Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Max Planck, Marie Curie et Albert Einstein.

Ce conseil est le théâtre de vives discussions autour de la physique quantique, notamment après l'exposé par Niels Bohr de l'interprétation de Copenhague, qui appréhende de manière révolutionnaire la nouvelle physique et son rapport à la réalité.

Bohr, qui espérait remporter l'adhésion unanime de ses collègues, suscite au contraire une rupture entre les partisans de l'école de Copenhague et ses opposants (avec Einstein en chef de file) qui pensent que le caractère indéterministe de la physique quantique est une preuve de l'incomplétude de cette théorie. C'est d'ailleurs lors de ce congrès qu'Einstein prononce une formule restée ensuite célèbre : « Dieu ne joue pas aux dés. »

Le congrès Solvay

L'essentiel en 5 secondes

- **Dès 1911, le congrès Solvay réunit tous les 3 ans les plus grands savants de l'époque, notamment autour des questions soulevées par la physique quantique.**
- **Le congrès Solvay de 1927 réunit 29 scientifiques, dont 17 lauréats du prix Nobel.**
- **Il est le lieu de vives controverses autour de l'interprétation de Copenhague et de sa conception de la réalité.**

25

EINSTEIN ET

LA QUANTIQUE

Si Einstein, avec sa démonstration de l'existence des atomes puis sa découverte des quanta de lumière (les photons), est l'un des pères fondateurs de la physique quantique, il n'adhère néanmoins pas à ses développements ultérieurs.

La philosophie d'Einstein

Afin de décrire le monde de l'infiniment petit, la physique quantique repose sur les probabilités, considère que l'on ne peut parler des objets quantiques que lorsqu'on les observe, et affirme qu'ils n'ont pas de réalité physique en dehors de la mesure.

Pour Einstein, même si la physique quantique fait des merveilles prédictives vérifiées par l'expérience, son incapacité à dresser un portrait complet de la réalité du monde de l'infiniment petit et son indéterminisme fondamental prouvent l'incomplétude de cette théorie. Selon lui, on ne peut pas se contenter des résultats d'une théorie si l'on n'a pas saisi leur origine ni leur pourquoi : une théorie scientifique doit être capable de présenter la réalité du monde qui nous entoure, de manière objective et déterministe.

Ses expériences de pensée

Lorsque Niels Bohr expose son interprétation de la physique quantique au congrès Solvay de 1927, Einstein s'oppose vigoureusement à lui. Malgré le manque de clarté de Bohr dénoncé par ses opposants, la majorité des physiciens se rallie pourtant à son interprétation.

Einstein ne s'arrête pas aux critiques qu'il exprime lors du congrès de 1927 : il passera sa vie à développer des expériences de pensée qu'il soumettra régulièrement à Bohr pour démontrer les failles de la théorie.

La première réelle attaque d'Einstein par expérience de pensée a lieu lors du congrès Solvay de 1930. Il présente à Bohr une expérience appelée la « boîte à photons » qui, si elle ébranle dans un premier temps son opposant, est dès le lendemain déjouée par ce dernier.

LA BOÎTE À PHOTONS

La boîte à photons est un appareil imaginaire qui libère un seul photon dont on peut connaître avec précision la masse et l'instant exact de la pesée. Cette expérience de pensée met en défaut le principe d'indétermination et la physique quantique. Mais Niels Bohr trouve la parade à l'attaque d'Einstein en se servant… de la théorie de la relativité !

Einstein revient par la suite à la charge de manière spectaculaire en 1934, alors qu'il a migré aux États-Unis, avec une nouvelle expérience de pensée, le « paradoxe EPR », qui fera couler beaucoup d'encre. La physique quantique explique que deux particules qui ont été intriquées (c'est-à-dire qui ont un passé commun, comme deux photons issus d'un même atome) se comportent de la même façon, quelle que soit la distance qui les sépare. Au travers du paradoxe EPR, Einstein démontre le non-sens de ces dires. Bohr a cette fois-ci du mal à s'en sortir, et ses arguments sont peu convaincants. Dans les années 1980 cependant, le paradoxe EPR est testé, et la raison est donnée à Niels Bohr : la physique quantique est une théorie à part entière.

Einstein aura ainsi passé dans sa vie plus de temps à vouloir démontrer l'incomplétude de la physique quantique qu'à l'élaboration de sa théorie de la relativité. Mais ses objections, plutôt

que d’affaiblir la théorie quantique, ont permis à ses partisans de clarifier et renforcer leurs idées. Malgré leurs divergences, Einstein et Bohr resteront amis durant toute leur vie.

L’AUTRUCHE

Quelques années avant sa mort, Einstein a écrit à de Broglie : « Je dois ressembler à une autruche qui sans cesse cache sa tête pour ne pas faire face aux méchants quanta. »

Einstein et la quantique

L’essentiel en 5 secondes

- **Selon Einstein, la science se doit de décrire la réalité du monde physique, ce que la physique quantique ne fait pas.**
- **Pour tenter de démontrer l’incomplétude de la théorie quantique, Einstein imagine au cours de sa vie toute une série d’expériences de pensée qu’il soumet au monde des physiciens.**
- **La plus connue d’entre elles est celle du paradoxe EPR.**

26

L'INTRICATION QUANTIQUE

En physique quantique, on parle d'intrication lorsque deux particules, malgré leur distance, se comportent comme un tout : une modification sur l'une d'elles entraîne un changement sur l'autre.

Un paradoxe ?

Selon la théorie quantique, deux particules sont intriquées lorsqu'elles ont une histoire commune – par exemple lorsqu'elles sont issues d'un même atome. L'intrication implique que, quelle que soit la distance qui les sépare, elles continuent à se comporter en relation l'une à l'autre, de manière identique.

Pour Einstein, qui ne partage pas l'interprétation de la physique quantique et ses étrangetés, ce phénomène est invraisemblable, car il contredit le principe de localité, selon lequel deux objets distants ne peuvent avoir une influence l'un sur l'autre. Pour mettre en évidence l'aspect paradoxal de l'intrication, Einstein met au point en 1935 avec ses collaborateurs Podolsky et Rosen une expérience de pensée intitulée « paradoxe EPR ».

Il imagine deux particules issues d'un même atome (donc intriquées selon la théorie) qui partent dans deux directions opposées. Puis il fait subir une contrainte à l'une d'elles qui l'oblige à réagir d'une certaine façon : selon les dires de la physique quantique, la seconde devrait donc réagir exactement pareil, quelle que soit la distance qui la sépare de la première, signifiant donc que la seconde est automatiquement informée du comportement de la première. Or, la théorie de la relativité (qui a aussi fait ses preuves) dit que rien ne peut se déplacer plus rapidement que la vitesse de la lumière. L'information entre les deux particules ne peut ainsi être communiquée instantanément.

Démonstration

Le chef de file des physiciens quantiques, Niels Bohr, s'en tire maladroitement en expliquant que le paradoxe EPR n'a aucun sens logique, car dans le cadre de la physique quantique, on doit considérer les deux particules comme un tout indissociable, alors qu'Einstein les traite indépendamment. Des variables cachées, prouvant que la physique quantique n'est pas une théorie complète, ne peuvent par ailleurs exister, car une particule n'a pas de caractéristiques préexistantes, celles-ci n'étant définies qu'au moment de la mesure.

En 1982, l'équipe du physicien français Alain Aspect réussit à tester le paradoxe EPR en observant le comportement de deux photons intriqués. Verdict : l'expérience donne raison à Bohr. Malgré l'aspect paradoxal de ce phénomène, l'intrication quantique fait bien partie du paysage de la physique quantique, dans laquelle la notion de distance n'a plus lieu d'être pour ces particules, qui peuvent théoriquement demeurer intriquées sur des échelles intergalactiques.

L'intrication sera démontrée une fois de plus dans les années 2000, prouvant par ailleurs que les particules corrélées se comportent aussi comme si le temps n'existait pas, et que dans le monde de l'infiniment petit, il n'y pas de représentation spatio-temporelle. Cette expérience remet d'ailleurs en question le principe de causalité (qui dit que la cause précède toujours le fait) car cette dernière est dépendante du temps qui s'écoule. Einstein doit se retourner dans sa tombe !

Conclusion

Si l'on interprète cette expérience avec la pensée d'Einstein – qui repose sur la physique classique et considère que la réalité est morcelée et localisée sur chacune des particules –, on perçoit un réel paradoxe dans l'intrication. Mais si l'on considère que les deux particules font partie d'une réalité globale, quelle que soit la distance qui les sépare, le paradoxe disparaît : les particules n'ont pas besoin de s'envoyer de signaux, car elles restent constamment en relation, comme interconnectées. La résolution de ce paradoxe requiert de se défaire du préjugé selon lequel les propriétés des particules sont localisées sur les particules elles-mêmes. Le paradoxe EPR (qui n'en est pas un au regard de la physique quantique) nous suggère une approche de la réalité globale, interdépendante.

L'intrication quantique

L'essentiel en 5 secondes

- **En physique quantique, on parle d'intrication lorsque deux particules, malgré leur distance, se comportent comme un tout : une modification sur l'une d'elles entraîne un changement sur l'autre.**
- **Einstein imagine l'expérience de pensée du paradoxe EPR pour montrer que ce phénomène est invraisemblable.**
- **Le paradoxe EPR sera plus tard réalisé de manière expérimentale, montrant l'interdépendance des phénomènes dans le monde quantique.**

27

LES INÉGALITÉS DE BELL

Les inégalités de Bell sont des relations mathématiques qui ont largement alimenté le débat sur l'interprétation de la physique quantique. Elles sont aujourd'hui un chapitre important de l'histoire de cette théorie.

Genèse des inégalités

Le physicien irlandais John Stewart Bell (1928-1990) fait partie des physiciens, comme Einstein ou Schrödinger, en désaccord avec l'interprétation de Copenhague de la physique quantique : il ne peut accepter l'abandon de l'image claire ainsi que le recours aux probabilités pour décrire les objets de l'infiniment petit.

Aussi, l'article écrit par Einstein et ses collaborateurs en 1935 sur le célèbre paradoxe EPR, une expérience de pensée pour tenter de montrer la nature paradoxale de l'interprétation de Copenhague qui serait la preuve de l'incomplétude de la théorie quantique, fascine Bell. Selon les auteurs de l'article, l'utilisation des probabilités en physique quantique ne serait qu'un moyen détourné pour obtenir, par des moyennes, des informations sur les propriétés des particules. Mais il existerait, derrière les phénomènes quantiques observés, une dynamique non encore découverte, des variables cachées qui détermineraient précisément, comme en physique classique, les propriétés des particules. Selon eux, la physique quantique est donc incomplète et doit être reformulée afin de résoudre le paradoxe EPR et d'éliminer le recours aux probabilités.

En théorie

À défaut de trouver une nouvelle formulation de la physique quantique, Bell publie en 1964 un article présentant des inégalités mathématiques qui portent sur une expérience du type de celle imaginée par Einstein. Sorte de test pour la théorie quantique, le respect des inégalités par les résultats de l'expérience EPR apporterait la preuve que l'usage des probabilités en physique quantique est le fait d'une théorie encore incomplète, qu'il existe des variables cachées et une théorie déterministe (à la manière de la physique classique), en accord avec la pensée d'Einstein et de ses acolytes.

Ces inégalités sont fondées sur trois hypothèses :

- Le principe de localité : deux objets distants ne peuvent avoir une influence instantanée l'un sur l'autre, et un signal entre les deux ne peut se propager à une vitesse plus grande que celle de la lumière dans le vide ;
- La causalité : l'état des particules est déterminé uniquement par leur état initial et l'ensemble des influences perçues dans le passé ;
- Le réalisme : des particules individuelles sont des entités qui possèdent des propriétés propres et qu'elles véhiculent avec elles.

En pratique

Des expériences de type EPR sont mises en pratique dans les années qui suivent (celle de l'équipe d'Alain Aspect en 1982 à l'université d'Orsay étant la plus rigoureuse et irréfutable). À la surprise générale des physiciens du monde entier, les résultats transgressent systématiquement les inégalités de Bell, obligeant à renoncer à l'une des trois hypothèses, et renforçant l'interprétation de Copenhague de la physique quantique : cette théorie ne serait donc pas incomplète, et il n'existerait pas de variables cachées.

L'indéterminisme se cachant derrière l'utilisation des probabilités dans la description des objets de l'infiniment petit est donc intrinsèque à la réalité du monde quantique.

Les inégalités de Bell

L'essentiel en 5 secondes

- **Le travail du physicien Bell vient alimenter le débat sur l'interprétation de la physique quantique.**
- **Ses inégalités sont des relations mathématiques grâce auxquelles on peut tester l'incomplétude de cette théorie.**
- **Toutes les expériences qui les ont mises en pratique montrent que les inégalités sont transgressées et que la physique quantique est donc une théorie complète.**

28

QUESTION

DE RÉALISME

Ce qui se cache derrière la notion de réalité et notre accès à cette dernière est discuté depuis que les hommes réfléchissent sur eux-mêmes et le monde. Ce qui peut sembler au premier abord n'être que considérations philosophiques devient un débat intense au sein même de la science avec le développement de la physique quantique.

La mécanique du monde

La réalité est généralement définie par l'ensemble des phénomènes envisagés comme existant effectivement – ce qui est concret –, par opposition à ce qui est imaginé, rêvé ou fictif. La science, dans son essence et son histoire, tente de saisir, de comprendre et d'expliquer cette réalité.

Jusqu'à la fin du XIXe siècle, on considère largement que la réalité nous est accessible, et le scientifique est un observateur extérieur aux phénomènes qu'il peut décrire objectivement. La physique classique aborde le monde d'une manière dite « mécaniste » : pour elle, tout ce qui existe peut être dépeint comme une mécanique dont les rouages et les pièces sont des concepts familiers – le réel est ainsi construit telle une horloge. Pour les savants, la connaissance de toutes les parties et phénomènes du monde réel assure également la connaissance du Tout.

Un grain de sable quantique dans les rouages

La découverte de la physique quantique vient chambouler le rapport que les savants classiques entretiennent au monde. La manière dont cette nouvelle physique aborde le monde réel remet en cause tous nos concepts usuels, et questionne tout bonnement notre accès à la réalité.

Selon la physique quantique, on ne peut par exemple plus attribuer d'existence aux objets microscopiques en dehors de la mesure ; leur nature est par ailleurs multiple, ils se comportent de manière interdépendante, etc.

Surtout, cette drôle de science remet en question une croyance que l'on tenait pourtant pour indissociable de la science : celle qui dit qu'une théorie scientifique a pour but de décrire le monde tel qu'il est, indépendamment des moyens servant à l'explorer.

Cette dernière idée dirige la pensée de ceux qui prônent le réalisme scientifique, avec Einstein à leur tête. Selon eux, la science constitue une description objective de la réalité, et le réel est totalement intelligible. Si on ne peut pas décrire le réel au moyen de concepts familiers, on peut au moins le faire grâce à des concepts mathématiques. La science reste une description de ce qui est, et si la physique quantique ne parvient pas à détailler précisément les objets étudiés, c'est que cette théorie est encore incomplète.

Les autres (dont Bohr, avec son interprétation de Copenhague, est le chef de file) rejettent bien sûr ce réalisme : pour eux, cela n'a pas de sens d'attribuer de propriétés aux objets quantiques en dehors de la mesure, de même qu'il est insensé de se préoccuper du réel, ce dernier n'ayant pas de sens en lui-même. La physique quantique est efficace, c'est le plus important. Une théorie scientifique se doit seulement de prédire les résultats des expériences que nous pouvons faire sur le monde, pas d'expliquer ce dernier.

Un réel multiple

Une chose est sûre : la physique quantique questionne notre rapport à la réalité, oblige à revoir nos concepts, et même à en imaginer de nouveaux.

Certains perçoivent aujourd'hui le monde comme une totalité non analysable, un Tout inséparable, la distinction en divers corps matériels n'étant qu'une apparence superficielle. D'autres pensent la physique quantique comme une théorie de l'information expérimentale, plutôt que comme une théorie d'illusoires propriétés indépendantes. Certains pensent encore que le réel est voilé, la science ne pouvant en révéler qu'une partie. Pour d'autres, enfin, l'accessibilité au réel est compliquée parce que nous y sommes directement impliqués.

De ce débat sur la réalité, une nouvelle conception de la science apparaît, qui tient compte du fait que nous fassions effectivement partie intégrante du réel, par nos corps, nos actions, nos techniques et nos idées. Il est vain de vouloir dire quelque chose du monde indépendamment des relations que nous entretenons avec lui.

Question de réalisme

L'essentiel en 5 secondes

- **Jusqu'à la fin du XIXe siècle, il est considéré que la réalité nous est accessible, et que le scientifique est un observateur extérieur aux phénomènes qu'il peut décrire objectivement.**
- **La physique quantique déclenche un vif débat sur le rapport de la science au réel.**
- **De ce débat sur la réalité, une nouvelle conception de la science apparaît, qui tient compte du fait que nous fassions partie intégrante du réel.**

29

LA DÉCOHÉRENCE QUANTIQUE

Pourquoi les phénomènes observés dans le monde quantique ne sont-ils pas observables dans le monde réel ? Pourquoi, par exemple, une particule peut-elle être dans deux états à la fois, mais un chat ne peut-il pas être simultanément mort et vivant ? La décohérence quantique se penche sur la question.

Constat

Il est un constat surprenant, paradoxal, mais bien réel : les lois qui gouvernent le monde quantique ne sont pas les mêmes que celles qui régissent le monde qui nous entoure. Les effets quantiques disparaissent quand on passe à l'échelle macroscopique.

Lorsque le physicien Erwin Schrödinger tenta de montrer la nature paradoxale et les lacunes de la physique quantique avec son expérience mettant en scène un chat à la fois mort et vivant, il avait d'un côté raison d'affirmer qu'un chat, objet du monde macroscopique, ne peut être dans deux états à la fois, mais tort aussi, car un objet du monde quantique, lui, peut en revanche l'être : la superposition des états fait partie intégrante des étrangetés quantiques.

Le questionnement sur la transposition des phénomènes quantiques à notre quotidien perdure : après tout, le monde qui nous entoure et nous-mêmes sommes constitués d'objets quantiques. Par exemple, le corps humain est constitué d'environ 10^{29} (1 avec 29 zéros) quarks, particules constituantes du noyau atomique.

Explication

Aujourd'hui, la frontière diffuse séparant mondes quantique et classique est mieux comprise. Grâce à la théorie de la décohérence quantique, on peut comprendre pourquoi et comment s'effectue la transition entre ces deux mondes.

Un objet quantique est caractérisé par la superposition de différents états (comme les différentes positions d'un électron dans un atome), et c'est par une mesure sur cet objet qu'un seul des états va être sélectionné : on appelle ça la « réduction du paquet d'ondes ». De manière générale, la mesure perturbe le système quantique.

C'est l'interaction avec l'environnement (air, lumière, etc.) dans lequel baigne l'objet macroscopique qui lui fait perdre ses propriétés quantiques. Toute interaction (la rencontre d'un photon, d'une molécule) agit comme une mesure et perturbe l'objet. Ces interactions étant, pour un objet macroscopique, très nombreuses (même quasi permanentes), il perd très rapidement ses propriétés quantiques. Voilà donc pourquoi le chat de Schrödinger ne peut être à la fois mort et vivant.

Le phénomène de décohérence quantique a pu être récemment montré par plusieurs expériences, mettant en évidence la transition entre comportements quantiques et classiques.

La décohérence quantique

L'essentiel en 5 secondes

- **Les lois qui gouvernent les mondes macroscopique et quantique ne sont pas les mêmes.**
- **Les phénomènes quantiques observés dans le monde de l'infiniment petit disparaissent dans le monde à notre échelle.**
- **La théorie de la décohérence apporte une raison à cela : ce sont les interactions permanentes des objets macroscopiques avec l'environnement qui leur font perdre leurs comportement quantiques.**


30
L'EFFET TUNNEL

Ce phénomène observable dans le monde de l'infiniment petit fait partie des bizarreries que la physique quantique (à la différence de la physique classique) autorise.

Description

Imaginons que nous fassions face à une petite colline, une balle à la main. Si nous lançons cette dernière le long de la pente montante de la colline à une vitesse suffisante, la balle possédera assez d'énergie pour rouler jusqu'au sommet, puis pour redescendre sur la pente de l'autre côté. Si la balle n'a, en revanche, pas la vitesse suffisante, elle n'atteindra pas le sommet et ne passera pas de l'autre côté de la colline : elle ralentira, puis reviendra vers nous.

Les physiciens disent que la balle est dans ce cas arrêtée par une barrière de potentiel. Selon la physique classique, elle ne peut franchir cette barrière que si elle a suffisamment d'énergie. Le contraire lui est interdit.

Dans le monde quantique cependant, il en est tout autrement. Une particule peut franchir une barrière de potentiel, même si elle ne possède pas l'énergie nécessaire pour cela. On appelle ce phénomène l'« effet tunnel », ce dernier étant un effet purement quantique.

Explication quantique

La physique quantique ne prétend pas que toutes les particules vont franchir la barrière de potentiel : elle montre simplement que la probabilité qu'une particule a de passer n'est jamais complètement nulle. Dans un flux de particules qui rencontrent un obstacle, certaines rebondissent et repartent en arrière, mais d'autres passent, d'autant plus que l'obstacle est fin. Dans le monde quantique, aucune barrière n'est donc totalement étanche.

La probabilité de passage de la barrière dépend de la hauteur et de la largeur de cette dernière. Plus la particule est lourde et la barrière haute, moins l'effet tunnel a de chance de se produire. La probabilité que la balle de l'exemple précédent passe par-dessus la colline sans avoir une vitesse suffisante est alors extrêmement faible : nous n'observons jamais l'effet tunnel dans le monde macroscopique (celui qui nous entoure).

L'effet tunnel peut ainsi se comprendre grâce aux lois de la physique quantique qui donnent une probabilité non nulle de détecter une particule là où sa présence serait pourtant impossible selon la physique classique.

Si l'on se représente la particule comme un corpuscule classique, cette prédiction n'a aucun sens, mais si on la visualise comme une onde, elle prend davantage de sens. D'une certaine manière, l'effet tunnel vient du caractère ondulatoire et imprécis de la matière à l'état quantique. Mais cela ne reste qu'une image, dont le recours en physique quantique est toujours risqué : une onde quantique n'est pas une onde classique.

En action

L'effet tunnel trouve de nombreuses applications dans le monde contemporain : microscope électronique à effet tunnel pour voir les atomes, diode à effet tunnel en électronique, etc.

C'est aussi lui qui est responsable de l'émission de particules alpha par des noyaux radioactifs. On le retrouve enfin dans des réactions chimiques qui ont lieu malgré des conditions de froid

importantes, comme par exemple dans le milieu interstellaire.

L’effet tunnel

L’essentiel en 5 secondes

- **L’« effet tunnel » est le nom donné à un phénomène observé dans le monde de l’infiniment petit : une particule peut franchir un obstacle, même si elle ne possède pas l’énergie suffisante pour cela.**
- **Ce phénomène, interdit par les lois de la physique classique, est explicable grâce à la physique quantique.**
- **L’effet tunnel s’observe dans diverses réactions chimiques et radioactives de la nature, et a de nombreuses applications dans le monde contemporain.**

31

L'EXPÉRIENCE DU CHOIX RETARDÉ

La physique quantique n'en finit pas de surprendre néophytes comme physiciens. Dans cette expérience célèbre, il semblerait que le futur puisse parfois influencer le passé.

Une expérience de pensée bien étrange

En 1978, le physicien américain John Wheeler (1911-2008) imagine une expérience de pensée plutôt surprenante.

Son idée s'appuie sur l'expérience des deux fentes – qui montre comment un objet quantique peut, selon le choix du type de mesure effectuée, se comporter comme une onde ou comme une particule. Lorsque l'on fait passer des photons par les fentes et que l'on choisit d'effectuer une mesure afin de détecter des particules, on observe des impacts sur l'écran de l'autre côté, preuve d'un comportement particulaire. Si le dispositif expérimental est en revanche conçu pour mettre en évidence des ondes, on observe sur l'écran une figure d'interférence, preuve cette fois-ci d'un comportement ondulatoire.

John Wheeler se demande à quel moment l'objet quantique fait le choix de se comporter de telle ou telle manière. Pour répondre à cette question, il imagine un dispositif expérimental où le choix du type de mesure se fait le plus tard possible, lorsque l'objet quantique étudié est déjà à l'intérieur du dispositif : l'objet, lorsqu'il passe à travers les fentes, ne sait donc pas encore quel type de mesure va être effectuée.

De la théorie à la pratique

Si l'expérience de pensée de Wheeler resta longtemps du domaine de la théorie, elle est aujourd'hui réalisable expérimentalement.

Pour cela, on reprend l'expérience de la double fente dans l'objectif d'examiner le passage d'un objet quantique à travers le dispositif, mais au lieu de déterminer son passage au moment où il traverse les fentes, on attend qu'il les ait largement dépassées. Et on choisit aléatoirement, au dernier moment, un dispositif de mesure soit pour observer les figures d'interférences propres aux ondes, soit pour observer des particules. Dans les années 2000, une équipe française teste l'expérience de Wheeler en utilisant comme appareil de mesure un interféromètre de 50 m de long. Le choix de la mesure ne se fait que lorsque la particule (ici un photon) se trouve au milieu du dispositif, de manière aléatoire. L'expérience montre que le photon, malgré ces conditions, ne se laisse jamais surprendre : s'il est choisi de mesurer une onde, il se comporte comme une onde, sinon comme un corpuscule.

En 2017, cette expérience est à nouveau conduite avec, cette fois-ci, des satellites dans l'espace sur lesquels on fait rebondir, depuis la Terre, des photons émis par un laser qui ont parcouru 3 500 km : les résultats sont les mêmes que dans l'expérience précédente, conformes aux prédictions de la physique quantique.

Conclusions

Dans cette expérience, tout se déroule comme si, lorsque le type de mesure est choisi, le photon en avait été informé avant son passage par les deux fentes, puisque c'est finalement la forme de ce passage (s'il passe par une ou par deux fentes) qui va être responsable de la

formation ou non d'une figure d'interférence sur l'écran, et donc de son comportement ondulatoire ou corpusculaire.

Cette expérience pourrait signifier que, dans le monde quantique, le passé dépendrait du futur. Une telle observation soulève bien des interrogations, sur les relations causales entre le futur et le passé, sur la direction du temps, etc. Mais ces phénomènes demeurent mystérieux, et il est sage de rester prudent quant aux conclusions à en tirer.

UNE AUTRE EXPÉRIENCE SURPRENANTE

Si l'expérience du choix retardé est surprenante, celle de la contrafactualité l'est au moins autant. Cette expérience montre, elle, que des événements qui auraient pu se produire – mais ne se sont pas produits – influent sur les résultats de l'expérience.

L'expérience du choix retardé

L'essentiel en 5 secondes

- **L'expérience du choix retardé fait partie des phénomènes les plus surprenants de la physique quantique.**
- **Elle montre qu'une mesure sur un objet quantique pourrait influer sur son passé, comme si ce dernier dépendait du futur.**
- **Cette expérience a pu être réalisée plusieurs fois, confirmant systématiquement les thèses de la physique quantique.**

32

L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

Parmi les rêves des physiciens, il y a celui de réunir en une seule les diverses théories décrivant les multiples phénomènes observés. L'électrodynamique quantique est un pas en avant dans cette quête : cette théorie réussit à marier la physique quantique et l'électromagnétisme.

De mystérieuses lignes de force

Le champ électromagnétique, découvert au XIX[e] siècle, représente dans l'espace les forces exercées à distance par des particules chargées électriquement. Mais si les physiciens constatent l'existence de ce phénomène, ils sont incapables de l'expliquer. Comme pour la force de gravitation qui attire les planètes entre elles, la nature de la force électromagnétique reste un mystère à cette période.

Le champ électromagnétique, dans sa description classique, est par ailleurs matérialisé par des lignes de force. Celles-ci sont définies comme responsables des interactions entre les particules immergées dans le champ.

Le rôle des photons

Paul Dirac, le physicien anglais qui a découvert l'antimatière en réunissant la physique quantique et la relativité restreinte d'Einstein dans les années 1920, se penche sur la problématique du champ électromagnétique.

À l'époque, l'atome quantique de Niels Bohr, dont la structure est quantifiée, va de succès en succès pour décrire les différents phénomènes liés aux atomes. De la même manière, Dirac décide de quantifier le champ électromagnétique. Si l'existence d'un tel champ est due à la présence de particules chargées électriquement, Dirac a l'intuition que les interactions entre ces particules ne se font pas par d'hypothétiques lignes de force, mais par l'intermédiaire de quanta : il introduit ainsi la quantification du champ électromagnétique, en émettant l'hypothèse que ces quanta sont des photons, et qu'ils sont responsables des forces existantes dans un champ électromagnétique. Cette hypothèse marque la naissance de l'électrodynamique quantique.

Dans le cadre de cette nouvelle théorie, les particules chargées interagissent à distance par échange de photons, ces derniers devenant les vecteurs de la force électromagnétique : l'électromagnétisme et la physique quantique se trouvent réunis.

L'apport de Feynman

Le travail de Dirac ne s'applique néanmoins qu'à une particule située dans un champ électromagnétique et ne peut prendre en compte les interactions entre plusieurs particules.

Dans les années 1940, le physicien américain Richard Feynman (1918-1988) va reprendre le travail de Dirac et le développer pour aboutir à une théorie complète de l'électrodynamique quantique. Comme Dirac, il pense que ce sont les photons qui sont les vecteurs de l'interaction électromagnétique et que les lignes de force n'existent pas.

Dans son travail, il s'intéresse notamment au chemin choisi par le photon pour aller d'une particule à l'autre et exercer le plus vite possible son rôle de vecteur de force. Il conçoit pour cela un outil mathématique appelé « intégrale de chemin », qui calcule la trajectoire complète

d'un photon dans un champ électromagnétique. Plus tard, il développe un outil graphique pour visualiser les interactions entre particules : les diagrammes de Feynman.

L'électrodynamique quantique est aujourd'hui l'un des domaines de la physique les mieux connus, dont les prédictions sont extrêmement précises, et qui a ouvert le développement de la théorie quantique des champs.

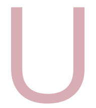
L'électrodynamique quantique

L'essentiel en 5 secondes

- **En physique classique, le champ électromagnétique, dont la nature reste inconnue, est matérialisé par des lignes de force responsables des interactions entre les particules chargées.**
- **L'électrodynamique quantique introduit la quantification en électromagnétisme : ce sont des photons qui sont les vecteurs de la force électromagnétique entre les particules chargées.**
- **Cette théorie est initiée par Paul Dirac puis développée par Richard Feynman, et marque la réunion de l'électromagnétisme et de la physique quantique.**



LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN


niversellement connus par les étudiants en physique, chercheurs, etc., les diagrammes de Feynman font partie des outils incontournables pour qui s'intéresse aux interactions entre les particules et, de manière générale, à la physique des particules.

Principe

Face à la complexité et l'abstraction des calculs en électrodynamique quantique (la théorie qui décrit la force électromagnétique de manière quantique), le physicien américain Richard Feynman met au point des techniques, qui prennent bientôt le nom de « diagrammes de Feynman », pour représenter par des figures les interactions entre particules.

Ces diagrammes sont en réalité des outils mathématiques puissants qui ont révolutionné la physique des particules en rendant accessibles, au travers de figures simples, des calculs et des concepts abstraits. Les calculs, à l'aide des diagrammes, se font non seulement plus rapidement et facilement, mais ils s'interprètent aussi physiquement beaucoup plus clairement.

À QUOI RESSEMBLE UN DIAGRAMME DE FEYNMAN ?

Un électron qui se déplace est représenté par une flèche indiquant la direction de son déplacement. Celui d'un photon est un trait ondulé. Une interaction entre le trajet d'un électron et celui d'un photon est par exemple représentée par une flèche allant vers la droite et rencontrant un trait ondulé, à l'intersection desquels repart une flèche vers la gauche (un électron change de direction quand il absorbe ou émet un photon).

Ils ont par la suite été généralisés à toutes les forces dont on connaît les particules vectrices (électromagnétique, puis forte et faible, exceptée la gravitation dont la particule graviton reste hypothétique), pour parvenir à représenter graphiquement l'ensemble des interactions entre particules dans le cadre d'une nouvelle théorie appelée « théorie quantique des champs ».

Professeur Feynman

Richard Feynman reçoit en 1965 le prix Nobel pour ses recherches. Ce grand esprit a contribué à faire progresser les connaissances dans de nombreux domaines : en physique quantique, bien entendu, mais aussi en physique des particules, cosmologie, nanotechnologies, informatique quantique, etc.

Mais ce savant brillant était aussi un formidable professeur, adoré par ses étudiants, ainsi qu'un remarquable vulgarisateur. Ses cours de physique sont devenus célèbres, et ses ouvrages et conférences ont inspiré toute une génération de physiciens. Facétieux, il n'hésitait pas à dire que si l'on croyait comprendre la physique quantique, c'est qu'on ne l'avait pas comprise.

En 1950, il devient de professeur de physique théorique à l'université brésilienne de Caltech, où il restera jusqu'à la fin de sa vie. Personnage hors norme, il est une icône dans les années 1980, après la diffusion d'un documentaire sur la BBC, racontant notamment son action à la commission d'enquête sur l'accident de la navette spatiale Challenger en 1986. Il publie d'autre part un livre autobiographique qui le montre comme un esprit libre et excentrique, ouvrant les coffres forts contenant les secrets de la fabrication de la bombe atomique à Los Alamos (il a participé au projet Manhattan), jouant du bongo, croquant des danseuses topless, etc.

Les diagrammes de Feynman

L'essentiel en 5 secondes

- **Les diagrammes de Feynman sont des outils graphiques qui facilitent les calculs abstraits concernant les interactions entre particules.**
- **L'utilisation de ces diagrammes a révolutionné la physique des particules.**
- **Richard Feynman, en plus d'être un brillant physicien, était aussi un excellent pédagogue. Ses cours, ouvrages et conférences ont acquis une réputation mondiale.**

34

LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

Sous ce nom, en apparence obscur, se cache une théorie bâtie grâce à la physique quantique qui décrit les interactions entre toutes les particules connues, des électrons aux protons, des positrons aux quarks. Cette théorie ouvre une meilleure compréhension des relations qui tissent le monde de l'infiniment petit.

Le pourquoi du comment

L'électrodynamique quantique développée dans les années 1940 permet de décrire l'interaction électromagnétique de manière quantique : la force électromagnétique entre des particules chargées électriquement est véhiculée par des photons. Mais cette théorie ne dit rien en ce qui concerne les autres types de forces.

Or, on connaît aujourd'hui quatre forces fondamentales : la force électromagnétique, la force forte, la force faible, et la force de gravitation. Si ce sont des photons qui sont responsables des interactions électromagnétiques entre les particules, quelles sont les particules responsables des interactions dues aux autres forces ?

La théorie quantique des champs a donc été élaborée pour compléter l'électrodynamique quantique (qui est finalement une théorie des champs pour l'interaction électromagnétique) et décrire ainsi de manière quantique les autres types d'interactions entre les particules. Elle y parvient aujourd'hui avec la force forte et la force faible.

Un peu d'ordre

Grâce à l'étude des rayons cosmiques, mais surtout grâce aux accélérateurs de particules, les chercheurs du XXe siècle ont assisté à la découverte d'une multitude de nouvelles particules, ce qui les obligea à les classer et à comprendre leurs interactions. Ils établirent peu à peu deux grandes familles : les fermions, formant la matière, et les bosons, particules vectrices de transmission des forces. C'est dans ce contexte qu'a été développée la théorie quantique des champs.

On sait aujourd'hui décrire dans un cadre quantique la force forte qui maintient les protons et les neutrons dans le noyau et les quarks dans les protons et les neutrons. Comme pour le champ électromagnétique, le champ qui lui est associé a été quantifié, et la particule qui est vectrice de la force forte et assure la cohésion du noyau s'appelle le « gluon ». De même, la force faible, responsable de la transformation des neutrons en protons et inversement, est transmise par une particule nommée « boson W ».

Insaisissable force de gravitation

Parmi les quatre forces fondamentales connues, une n'est cependant pas dépeinte dans le cadre de la théorie quantique des champs. C'est la force de gravitation, dont l'hypothétique particule appelée « graviton », qui transmettrait l'interaction entre les masses, n'a pas encore été découverte et dont l'existence n'est donc pas prouvée.

L'intégration de la gravitation dans les théories quantiques reste un défi à relever pour les générations de physiciens à venir.

La théorie quantique des champs

L'essentiel en 5 secondes

- **La théorie quantique des champs fut élaborée pour compléter l'électrodynamique quantique.**
- **Par elle, on peut décrire les interactions des particules dans les champs créés par trois des forces fondamentales : électromagnétique, forte et faible.**
- **La force gravitationnelle n'est pas représentée dans le cadre de cette théorie : la particule qui pourrait la véhiculer n'a jamais été observée.**

35

L'INFINIMENT PETIT, C'EST COMMENT ?

Grâce aux observations que nous faisons avec nos sens du monde macroscopique – celui qui nous entoure – nous pouvons le décrire, le dessiner. Mais le monde de l'infiniment petit ne s'appréhende pas de la même manière, car il n'est pas directement palpable par nos sens.

Représentations simplistes

Pour rester dans nos schémas classiques et ne pas perdre pied face au monde quantique, on représente fréquemment les atomes ou les particules par de petites boules ou des points fixes. Le noyau de l'atome est quant à lui souvent schématisé comme une sorte de framboise, dont les grains figurent les protons et neutrons qui le constituent. Les trajectoires fixes des électrons sont enfin décrites par des cercles autour du noyau – ou encore, parce que cette notion d'orbite est aujourd'hui dépassée, par une sorte de nuage diffus autour du noyau symbolisant la trajectoire indescriptible de l'électron (le nuage en question ne fait pourtant que décrire les régions de l'espace où la probabilité de le détecter est importante).

Toutes ces représentations sont néanmoins trop simplistes : la réalité du monde de l'infiniment petit est autre et inaccessible. À la fois onde et corpuscule, les objets qui le peuplent ne sont pas du tout statiques, mais animés de mouvements incessants.

La physique quantique se passe de dessin

À quoi ressemble alors le monde de l'infiniment petit, celui qui est décrit par la physique quantique ?

Selon beaucoup de physiciens, on ne peut tout simplement pas le savoir. Le monde quantique est insaisissable, contre-intuitif. De manière générale, les objets quantiques ne peuvent pas être représentés par des images : seules les mathématiques sont aptes à les décrire, seule l'abstraction nous en donne l'accès. Si cette abstraction déroute, les formidables prédictions de la physique quantique suffisent cependant à convaincre de sa justesse pour appréhender le monde de l'infiniment petit.

Pour caractériser les objets quantiques, il faut sortir de notre système de représentation classique, changer de langage, et dépasser les notions d'images, de schémas, de dessins.

Vue sur l'atome

Grâce à certaines technologies récentes, nous parvenons néanmoins à entrevoir les atomes. La lumière réfléchie par les objets qui nous entourent passe par nos yeux pour être traitée par notre cerveau qui en reconstitue des images. Les physiciens procèdent de la même manière avec les atomes : un faisceau laser ou le faisceau d'électrons d'un microscope électronique excite l'atome. L'atome émet de la lumière qui permet d'en reconstituer une image. La petite tâche lumineuse obtenue est cependant 10 000 fois plus grande que le diamètre de l'atome ; elle ne montre pas sa structure, mais suffit à connaître sa position moyenne, à distinguer les atomes les uns des autres, et même à les manipuler individuellement.

Tant dans le monde atomique que dans le monde macroscopique, il est donc possible de voir les objets grâce aux interactions que nous avons avec eux. Ces deux mondes n'obéissent pourtant pas aux mêmes lois. Et si l'interaction que nous avons avec les objets qui nous

entourent ne les modifie que très peu, l'acte d'observation du monde de l'infiniment petit le transforme : les faisceaux qui entrent en interaction avec l'atome pour le « voir » changent profondément son état. La réalité quantique en dehors de l'acte de mesure reste insaisissable. Peut-on attribuer une réalité autonome aux objets quantiques en dehors de la mesure, indépendamment de l'observation ? Le débat perdure.

L'infiniment petit, c'est comment ?

L'essentiel en 5 secondes

- **La représentation des objets quantiques par de petites boules statiques est trop simpliste et loin de la réalité du monde de l'infiniment petit.**
- **Seules les mathématiques sont aptes à décrire le monde quantique qui doit alors se passer d'image, à l'encontre de notre conception classique.**
- **On réussit aujourd'hui à obtenir des images d'atomes : l'interaction avec ces derniers questionne cependant sur la réalité du monde quantique en dehors de la mesure.**

36

LE MONDE

DU NOYAU

ans l'histoire de la physique quantique, la découverte de la constitution du noyau atomique constitue une révolution en elle-même, le noyau possédant aujourd'hui sa propre physique : la physique nucléaire.

La radioactivité

En 1896, le physicien français Henry Becquerel découvre qu'un matériau phosphorescent qu'il a placé au fond d'un tiroir (donc non exposé au soleil) émet un rayonnement invisible qu'il met en évidence grâce à une plaque photographique. Il comprend que ce rayonnement est dû à l'uranium contenu dans le matériau, et non à la phosphorescence. Par la suite, la physicienne polonaise Marie Curie se lance dans l'étude du rayonnement particulièrement intense issu du radium, et invente à cette occasion le mot « radioactivité ».

En 1913, le physicien danois Niels Bohr, qui travaille sur la composition de l'atome, s'aperçoit que c'est son noyau qui est responsable de la radioactivité, les électrons n'intervenant que dans les réactions chimiques. Et, avec la découverte de la radioactivité liée au noyau, la physique nucléaire voit le jour.

Un noyau radioactif est un noyau instable qui va se transformer spontanément au bout d'un certain temps en un autre noyau plus stable, cette transformation s'accompagnant de l'émission de rayonnement ou de particules, équivalent à la perte d'une certaine quantité d'énergie.

LA PÉRIODE RADIOACTIVE

La durée de transformation d'un matériau radioactif s'appelle la « période radioactive ». Elle est égale à la durée au bout de laquelle la moitié des atomes qui le constituent au départ se sont transformés en d'autres atomes, et peut durer de quelques fractions de secondes à plusieurs milliards d'années. Elle n'a de valeur que d'un point de vue statistique (nous sommes dans le monde quantique) : elle ne prédit pas quand chaque atome va exactement se désintégrer, mais seulement une moyenne pour un très grand nombre d'atomes radioactifs.

Le noyau de l'atome

Au cours du XXe siècle, on découvre donc peu à peu les constituants du noyau de l'atome : il est composé de protons et de neutrons (sauf l'hydrogène, dont le noyau ne contient qu'un seul proton) qu'on nomme aussi « nucléons ». La force qui lie les nucléons au sein des noyaux est la force forte qui, comme dit son nom, est extrêmement intense.

Un élément naturel (comme l'oxygène, le fer ou l'uranium) est défini par le nombre de protons contenus dans son noyau. Si un élément naturel (classifié dans le tableau périodique) regroupe tous les atomes qui ont le même nombre de protons, ils n'ont en revanche pas forcément tous une quantité identique de neutrons. Des atomes ayant le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents sont des « isotopes » : par exemple, le carbone 14 est un isotope du carbone 12, parce qu'il possède davantage de neutrons.

Les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, car ces dernières sont définies par le nombre d'électrons (qui est égal au nombre de protons), mais pas les mêmes propriétés nucléaires : le carbone 12 est stable, alors que le carbone 14 est radioactif.

La découverte du noyau atomique et la physique nucléaire ont donné lieu à de grandes avancées, autant dans la compréhension du monde qui nous entoure que dans le développement du monde moderne.

En astrophysique, ces connaissances ont aidé à expliquer le mécanisme de nucléosynthèse (la formation des noyaux) : on sait aujourd'hui que les noyaux légers se sont formés juste après le Big Bang, et les plus lourds au cœur des étoiles.

En archéologie, la méthode de datation au carbone 14 est devenue un outil incontournable, tout comme la radiothérapie ou l'IRM en médecine. Enfin, la découverte de l'immense quantité d'énergie libérée lors de la fission de noyaux lourds est à l'origine de la bombe atomique et de nos centrales nucléaires.

Le monde du noyau

L'essentiel en 5 secondes

- **La radioactivité est un rayonnement naturel émis par des noyaux atomiques instables.**
- **La découverte de la radioactivité est à la source de la physique nucléaire, qui décrit les noyaux des atomes.**
- **La physique nucléaire a favorisé de nombreuses avancées, autant en astrophysique qu'en archéologie, en médecine ou dans la maîtrise de l'énergie.**

37

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Le monde quantique est celui des objets constituant l'infiniment petit. Ces objets sont les molécules, les atomes et les constituants des atomes : les particules. Les plus petites d'entre elles, insécables selon la connaissance actuelle, sont les particules élémentaires, et sont les constituants fondamentaux de la matière de l'Univers.

Les fermions

Les fermions sont les particules élémentaires sur lesquelles les forces fondamentales agissent. Leurs combinaisons créent les structures de l'Univers, des atomes aux plus grosses étoiles. Ils se divisent en deux catégories :

- Les quarks sont sensibles à la force forte. Dans l'Univers, il en existe six sortes : les physiciens les ont appelés quarks *strange*, *charm*, *beauty* (ou *bottom*), *top*, *down* et *up*. Les quarks up et down, en se regroupant par trois grâce à la force forte, sont les constituants des protons et des neutrons, eux-mêmes constituants des noyaux atomiques ;
- Les leptons, insensibles à la force forte, comprennent trois types de neutrinos dont la charge électrique est nulle, et des particules chargées électriquement : les électrons, les muons et les taus. Les électrons, premiers leptons découverts, peuvent se combiner, grâce à la force électromagnétique, avec les noyaux atomiques pour former des atomes.

Les bosons

Les bosons sont les particules médiatrices qui véhiculent les forces fondamentales. Ils comprennent les gluons (force forte), les photons (force électromagnétique), et les bosons Z et W (force faible). Par exemple, trois quarks se combinent entre eux en échangeant des gluons qui véhiculent la force forte, ou des électrons se combinent à des noyaux atomiques en échangeant des photons qui véhiculent la force électromagnétique.

LE BOSON DE HIGGS

Découvert très récemment, le boson de Higgs (du nom du physicien qui a prédit son existence) confère pour sa part la masse – qui n'est pas une propriété intrinsèque de la matière – aux particules. C'est l'intensité de l'interaction des particules de matière avec les bosons de Higgs se trouvant partout dans l'Univers, qui décide de leur masse : plus une particule peut entrer en interaction avec un Higgs, plus elle est massive.

Le modèle standard

Le modèle standard de la physique des particules est la théorie décrivant les particules élémentaires et les forces qui régissent leurs interactions. Dans ce cadre, les bosons et les fermions sont organisés dans un tableau, ces derniers étant regroupés en trois familles :

- La famille électronique comprend les quarks up et down, l'électron et le neutrino électronique ;
- La famille muonique comprend les quarks charm et strange, le muon et le neutrino muonique ;
- La famille tauique comprend enfin les quarks top et bottom, le tau et le neutrino tauique.

Seule la famille électronique constitue la matière ordinaire, les deux autres étant composées de particules plus lourdes et plus instables que l'on n'observe qu'en laboratoire pendant de courts instants.

Le modèle standard n'a cependant pas réussi à intégrer la quatrième force fondamentale : la gravitation. Celle-ci est décrite dans le cadre d'une autre théorie, celle de la relativité générale. La recherche d'une théorie capable de décrire toutes les forces fondamentales est un défi du XXIe siècle.

LA MATIÈRE ORDINAIRE

La matière ordinaire, celle qui nous constitue (ainsi que le monde qui nous entoure dans toute sa diversité), est principalement constituée de trois particules élémentaires : les quarks down et up, et les électrons. Les quarks s'associent par trois pour former les protons et les neutrons, qui forment à leur tour les noyaux atomiques, puis, associés aux électrons, les atomes.

Les particules élémentaires

L'essentiel en 5 secondes

- **Les fermions (quarks, électrons, neutrinos, etc.) sont les particules sur lesquelles les forces fondamentales agissent.**
- **Les bosons (gluons, photons, etc.) sont les particules qui véhiculent les forces fondamentales.**
- **Le modèle standard de la physique des particules est la théorie qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions.**

38

LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

Pour explorer la matière dans son aspect fondamental (c'est-à-dire le monde de l'infiniment petit), les physiciens ont inventé, au cours du XXe siècle, de nouveaux instruments, des sortes de microscopes géants : les accélérateurs de particules.

Principe

Les accélérateurs de particules, comme leur nom l'indique, accélèrent des particules à des vitesses vertigineuses, en utilisant des champs électriques et magnétiques. Lors de leur accélération, les particules se chargent en énergie. L'étude du monde de l'infiniment petit requiert en effet de très hautes énergies et des faisceaux de particules bien contrôlés. Il existe des accélérateurs linéaires et circulaires, ces derniers détenant le record d'énergie.

Dans les accélérateurs circulaires de type collisionneurs, les physiciens amènent des faisceaux de particules accélérées et chargées à très hautes énergies, circulant en sens inverse, à entrer en collision là où sont situés des détecteurs. Ces derniers peuvent être gigantesques, souvent de la taille de bâtiments de plusieurs étages. Ils sont équipés de divers instruments qui recueillent les résultats de la collision, particules mises en jeu et nouvellement créées.

Car l'énergie portée par les particules peut donner naissance à de nouvelles particules. Ce fait fut démontré par Einstein avec sa célèbre formule $E = mc^2$, prouvant l'équivalence de l'énergie et de la matière, et donc la possible transformation d'énergie en matière, ou de matière en énergie.

Le plus grand accélérateur du monde

Au laboratoire européen de physique des particules (CERN) près de Genève en Suisse, se trouve le Large Hadron Collider (LHC), qui est le plus puissant accélérateur du monde. De forme circulaire et d'une circonférence de 27 km, il est installé sous terre dans un tunnel situé sous la frontière franco-suisse.

Le LHC (« grand collisionneur de hadrons » en français) peut notamment provoquer des chocs frontaux entre des faisceaux de protons (les protons appartiennent à une catégorie de particules appelées « hadrons », d'où le nom du détecteur) circulant en sens inverse à une vitesse très proche de celle de la lumière.

Le LHC est équipé de sept détecteurs, dont quatre de très grande taille.

UN PROJET INTERNATIONAL

Le CERN, qui gère le LHC, est le plus grand centre de recherche en physique des particules du monde, et un modèle de collaboration internationale. 22 États en sont membres, il emploie plus de 3 000 personnes à plein temps et accueille successivement pour leurs expériences environ 13 000 scientifiques représentant 500 universités et plus de 100 nations.

Les objectifs

Les accélérateurs de particules autorisent l'étude de la matière dans différents domaines d'énergie. Ils simulent, entre autres, le comportement de la matière lorsqu'elle se trouvait à des températures très élevées dans l'Univers primordial. Lors des collisions de particules, les

physiciens peuvent ainsi reconstituer la nucléosynthèse (formation des noyaux atomiques), découvrir de nouvelles particules et étudier leurs familles, ou encore tenter de percer de nombreux autres secrets de la matière, comme la disparition de l'antimatière ou la compréhension de la matière noire et de l'énergie noire.

Le LHC a en particulier démontré en 2012 l'existence d'une fameuse particule, le boson de Higgs, clé de voûte du modèle standard, apportant ainsi une nouvelle validation à cette théorie qui décrit le monde de l'infiniment petit.

Les accélérateurs de particules

L'essentiel en 5 secondes

- **Un accélérateur de particules communique de très hautes énergies aux particules, ce qui ouvre à l'exploration du monde de l'infiniment petit.**
- **Le plus grand accélérateur du monde, le LHC (Large Hadron Collider), se trouve à Genève en Suisse.**
- **Les accélérateurs, en étudiant la matière dans différents domaines d'énergie, peuvent découvrir de nouvelles particules ou encore reproduire les conditions de l'Univers primordial.**

39

LES FORCES FONDAMENTALES

Quatre forces gouvernent tous les phénomènes ayant lieu dans l'Univers. Elles régissent les processus physiques, chimiques ou biologiques. Agents de cohésion, elles ordonnent la matière et la structurent en systèmes de plus en plus complexes tout au long de l'évolution de l'Univers : des particules élémentaires aux atomes, des étoiles aux galaxies, des planètes aux premières formes de vie.

La force électromagnétique

La force électromagnétique gouverne tous les phénomènes électriques et magnétiques, mais aussi optiques, car la lumière est une onde électromagnétique.

De portée infinie et véhiculée par les photons, cette force a la particularité d'agir entre des particules chargées électriquement. Quand deux particules ont une charge contraire, elles s'attirent ; si leurs charges sont égales, elles se repoussent. Les électrons de charge négative et les protons de charge positive s'attirent mutuellement pour former les atomes par exemple.

La force électromagnétique maintient les électrons au noyau de l'atome, ou les atomes dans les molécules, et rend donc compte de la cohésion de la matière à notre échelle. Elle contrôle toutes les réactions chimiques et la biologie. En astronomie, elle est notamment responsable des champs magnétiques des planètes ou des étoiles.

La force forte

Découverte par l'étude des éléments radioactifs, la force forte assure la cohésion des noyaux atomiques. Elle soude les particules quarks dans les protons et les neutrons, et agit de même sur ces derniers au sein du noyau. Elle est de très courte portée, ne s'étendant pas au-delà du noyau atomique, est très intense, et est véhiculée par une particule : le gluon.

Dans le ciel, elle est la source d'énergie des étoiles. Par sa puissance de cohésion, elle entraîne la nucléosynthèse (la formation des noyaux atomiques au cœur des étoiles). Quand son énergie se dégage rapidement, elle provoque des explosions : des bombes sur la Terre, des supernovæ dans le ciel.

La force faible

La force faible est responsable de la transformation des neutrons en protons et inversement. Lorsqu'un neutron, sous l'égide de la force faible, se transforme en proton, un électron et un neutrino sont émis, la désintégration des neutrons en protons engendre alors l'émission de neutrinos.

Cette force agit lentement, ce qui explique la durée de vie des étoiles : si elle était plus forte, les réactions nucléaires dans les cœurs stellaires seraient plus rapides et notre Soleil serait déjà mort.

Les particules médiatrices de la force faible sont les bosons W et Z qui ont été mis en évidence au CERN en 1984 grâce à un accélérateur de particules conçu pour cela.

La force de gravitation

La force de gravitation régit les interactions entre les grandes structures de l'Univers, comme le mouvement de la Lune autour de la Terre ou celui des étoiles au sein des galaxies. Cette force est la plus perceptible par nos sens : c'est elle qui nous retient sur Terre.

D'une portée infinie et toujours attractive, l'intensité de la gravitation dépend seulement de la masse des corps en présence et de la distance entre eux. Négligeable à l'échelle des particules, la gravité est d'autant plus intense que des particules sont mises en jeu, d'où son importance à grande échelle. La particule qui véhiculerait cette force, le graviton, n'a pas encore été découverte.

L'UNIFICATION DES FORCES

Les physiciens rêvent de prouver que les quatre forces fondamentales sont en réalité les manifestations d'une seule force unifiée. Au cours du siècle dernier, ils ont réussi à montrer l'unification des forces électromagnétiques, faibles et fortes, mais l'intégration de la force de gravitation reste problématique.

Les forces fondamentales

L'essentiel en 5 secondes

- **La force électromagnétique lie les électrons aux noyaux atomiques, ou les atomes dans les molécules.**
- **La force forte assure la cohésion des noyaux atomiques, soudant les quarks en nucléons et les nucléons entre eux.**
- **La force faible est responsable de la désintégration des neutrons en protons.**
- **La force de gravitation gouverne les interactions entre les plus grandes structures de l'Univers.**


40
LE QUARK

Particules élémentaires, les quarks constituent les protons et les neutrons qui composent eux-mêmes les noyaux atomiques de tous les éléments : le monde qui nous entoure, de la mousse au grand cerf, de l'être humain aux étoiles, est fait de quarks combinés aux autres particules élémentaires.

La découverte des quarks

Au milieu du XXe siècle, les physiciens n'ont de cesse de découvrir de nouvelles particules de matière, à tel point que l'on parle à cette époque d'un « zoo de particules ». Parmi elles, quelques centaines sensibles à la force forte sont appelées les hadrons.

Certains scientifiques pensent que dans la mesure où elles sont si nombreuses, ces particules ne sont pas élémentaires, mais composites. C'est le physicien américain Murray Gell-Mann qui prédit par la théorie l'existence des quarks : les hadrons, dans leur diversité, seraient composés de particules élémentaires, les quarks. Les hadrons à trois quarks sont les baryons, ceux à deux quarks les mésons.

L'existence des quarks est bientôt démontrée expérimentalement et Murray Gell-Mann obtient pour leur découverte le prix Nobel en 1969. Le terme « quark » a été choisi à partir d'une phrase du roman *Finnegans Wake* (James Joyce) : « Three quarks for Muster Mark ! »

Des saveurs et des couleurs

Il existe six sortes de quarks, caractérisés par ce que les physiciens, poètes à leurs heures, appellent des « saveurs », qui donnent leur nom aux différents quarks : *up*, *down*, *strange*, *charm*, *beauty* et *top*. Ces six quarks constituent tous les hadrons connus.

Le proton est par exemple composé de deux quarks up et d'un quark down, le neutron quant à lui d'un quark up et de deux down. Seuls les quarks down et les quarks up forment la matière ordinaire (celle qui nous constitue), les autres engendrant des particules instables.

Les quarks ont une autre propriété que les physiciens appellent « couleur ». Il existe trois couleurs possibles pour les quarks : rouge, bleu, et vert. Dans un proton ou un neutron, les quarks ont tous une couleur différente, on dit alors que les protons et les neutrons sont blancs. Seules les particules blanches sont observables en laboratoire. Les quarks sont donc inobservables seuls, car toujours confinés au sein d'un hadron.

Les quarks sont liés entre eux dans les hadrons par la force forte, véhiculée par les particules médiatrices gluons ; aux quarks correspondent les antiquarks, possédant des anticouleurs.

Jamais seuls

Dans les protons et les neutrons, les quarks et les gluons sont d'autant moins sensibles à la présence des autres particules qu'ils sont très proches les uns des autres. Paradoxalement, c'est donc dans une zone très exiguë que la force qui les lie devient presque nulle et qu'ils deviennent « libres ». Si l'on veut isoler un quark des autres quarks et des gluons, la force qui les attire augmente avec la distance de séparation : il est donc impossible d'isoler un quark.

UNE VÉRITABLE PARTICULE ÉLÉMENTAIRE ?

Avant la découverte du quark, les physiciens ont longtemps pensé que le proton était une particule élémentaire, c'est-à-dire insécable, et non composite. Aujourd'hui, ils sont plus prudents : le quark est considéré comme une particule élémentaire, jusqu'à preuve du contraire.

Le quark

L'essentiel en 5 secondes

- **Les quarks sont les particules élémentaires qui composent les hadrons (comme les protons et les neutrons).**
- **Il existe six quarks différents, nommés d'après leur saveur (*up*, *down*, *strange*, *charm*, *beauty*, *top*) et possédant une couleur (rouge, bleu ou vert).**
- **Un quark ne peut jamais être isolé.**


41
LE NEUTRINO

Dans le florilège des objets du monde de l'infiniment petit, le neutrino est la plus insaisissable de toutes les particules élémentaires.

La découverte du petit neutron

Dans les années 1920, les physiciens étudient la radioactivité et notamment la désintégration du neutron, particule constituante du noyau atomique. S'ils observent que cette désintégration émet un proton et un électron, ils font face à une énigme : le bilan énergétique de la transformation ne respecte pas la loi de conservation de l'énergie. La somme des énergies du proton et de l'électron est inférieure à l'énergie du neutron.

Le physicien autrichien Wolfgang Pauli (1900-1958) a alors l'intuition qu'une particule inconnue – et encore indétectable avec les techniques de l'époque – est émise dans le même temps et emporte avec elle cette énergie manquante. On baptise cette particule inconnue « neutrino », qui signifie « petit neutron » en italien.

Comme souvent en science, la théorie devance l'expérience. En 1955, les neutrinos sont détectés expérimentalement, confirmant l'hypothèse de Pauli.

Une particule insaisissable

Les neutrinos sont des particules très difficiles à détecter parce qu'ils parcourent la matière comme si elle était transparente, à une vitesse proche de celle de la lumière. Ils interagissent très peu avec la matière car ils sont extrêmement légers et électriquement neutres.

Chaque seconde, des centaines de milliards de neutrinos solaires traversent notre corps sans que nous nous en rendions compte, de jour comme de nuit. Si un abat-jour peut diminuer le flux lumineux en arrêtant un certain nombre de photons, il faudrait un écran de plomb de plusieurs années-lumière d'épaisseur pour obtenir le même résultat avec les neutrinos.

On sait que les neutrinos sont très légers, mais on ne connaît pas encore leur masse. D'autre part, les physiciens ne savent toujours pas si le neutrino est, ou non, identique à son antiparticule, l'antineutrino.

L'Univers des neutrinos

Aujourd'hui, la connaissance de l'Univers et de l'infiniment grand progresse grâce aux avancées dans le monde de l'infiniment petit. Dans ce contexte, les neutrinos en provenance de l'espace sont une importante source d'information.

Les neutrinos jouent un grand rôle dans la dynamique des phénomènes cosmiques. C'est par exemple *via* la découverte des neutrinos en provenance du Soleil que l'on a pu comprendre d'où le Soleil (et donc toutes les étoiles) tirait son énergie : des réactions nucléaires ont lieu au cœur des étoiles. Les supernovæ (l'explosion d'étoiles massives) émettent en particulier d'importants flux de neutrinos.

Comme ils interagissent très peu avec la matière, les neutrinos apportent des informations venant de lieux d'où nulle autre particule ne peut être issue, comme le cœur des étoiles, alors que la lumière (les photons) qu'elles émettent vient de leur surface.

En astronomie, l'observation de notre ciel se faisait jusqu'à aujourd'hui à l'aide de la lumière et donc des photons reçus. La détection des neutrinos cosmiques ouvre une autre fenêtre sur l'Univers.

LES DÉTECTEURS DE NEUTRINOS

Les neutrinos interagissant très faiblement avec la matière, ils sont difficiles à détecter. Les détecteurs doivent être immenses et composés d'une grande quantité de matériel. Ils sont situés sous terre ou sous la mer. Des télescopes à neutrinos sont par exemple déployés dans de grands volumes d'eau ou de glace, comme dans la mer Méditerranée ou en Antarctique.

Le neutrino

L'essentiel en 5 secondes

- **Le neutrino a été découvert par Wolfgang Pauli pour expliquer la désintégration du neutron.**
- **Cette particule élémentaire interagit très faiblement avec la matière car elle est très légère et électriquement neutre.**
- **La détection des neutrinos en provenance de l'Univers est une formidable source d'information sur les phénomènes cosmiques.**



42

LA MATIÈRE INCONNUE

Les particules élémentaires décrites dans le cadre des théories de l'infiniment petit constituent-elles toute la matière de l'Univers ? La réponse semble être non : depuis quelques dizaines d'années, les physiciens soupçonnent l'existence de formes de matière inconnues.

La matière noire

Les astrophysiciens ont constaté que la masse des galaxies visible par nos instruments de mesure (étoiles, nébuleuses, etc.) ne suffit pas à rendre compte de la vitesse de rotation des étoiles autour des noyaux galactiques, qui est plus élevée que ne le prévoit la théorie. Pour que l'équilibre soit conservé, il faudrait que cette masse soit beaucoup plus importante. La matière visible à nos instruments, compte tenu de sa vitesse de rotation, devrait s'échapper dans l'espace intergalactique et les galaxies devraient se défaire, ce qui n'est cependant pas le cas.

Une conclusion s'impose : les galaxies contiennent une matière invisible par nos instruments de détection. Cette matière exerce pourtant de la gravité sur ce qui l'entoure et stabilise ainsi les galaxies. À cette matière inconnue, les scientifiques ont donné le nom de « matière noire ».

La composition de la matière noire reste mystérieuse. Selon les physiciens, elle pourrait être faite de particules exotiques, des particules élémentaires jusqu'ici inconnues. Des moyens gigantesques sont mis en place pour essayer de mieux la comprendre, comme le LHC, l'accélérateur de particules européen à Genève.

L'énergie noire

On sait depuis le début du XXe siècle que les galaxies s'éloignent les unes des autres, montrant ainsi que l'Univers est en expansion. Les galaxies étant elles-mêmes soumises entre elles à la force de gravitation, il était considéré que leur vitesse d'éloignement devait diminuer sous l'effet de leur attraction mutuelle. Mais ce sujet ne fut pourtant réellement étudié que très récemment. Et, surprise, en mesurant la valeur de cette décélération, les astrophysiciens découvrent que non seulement les galaxies s'éloignent les unes des autres, mais aussi qu'elles vont de plus en plus vite : elles ne sont donc pas en décélération, mais en accélération.

Pour expliquer ce phénomène complètement inattendu, ils introduisent une nouvelle composante dans l'Univers : l'énergie noire, une force répulsive qui éloigne les galaxies les unes des autres. Si de nombreuses observations attestent aujourd'hui de son existence, sa nature, comme celle de la matière noire, reste inconnue.

LA COMPOSITION DE L'UNIVERS

Selon les calculs, l'énergie noire représente environ 68 % de la matière totale de l'Univers, et la matière noire 27 %. Les 5 % restant constituent la matière ordinaire, celle qui nous compose ainsi que le monde qui nous entoure, celle que nous connaissons le mieux et qui est observable par nos instruments. Cela signifie donc que 95 % de la matière de l'Univers nous échappe.

La matière inconnue existe-t-elle vraiment ?

Postuler l'existence de la matière noire et de l'énergie noire est une manière de rendre compte des phénomènes observés et d'assurer la cohérence des théories qui décrivent l'Univers. Certains physiciens pensent cependant qu'il faudrait remettre les théories en question au lieu d'invoquer des formes de matière inconnues.

Diverses observations provenant d'horizons variés montrent pourtant l'existence de ces matières inconnues et viennent donc appuyer leur existence. En science, quand plusieurs observations ou expériences conduisent aux mêmes résultats, on a de bonnes raisons de prendre le phénomène au sérieux.

La matière inconnue

L'essentiel en 5 secondes

» **Il existe dans l'Univers des formes de matière inconnues qui représentent 95 % de la matière totale.**
» **L'existence de la matière noire aide à rendre compte de la vitesse de rotation des étoiles dans les galaxies.**
» **L'existence de l'énergie noire explique quant à elle l'accélération de l'expansion de l'Univers.**


43
LE VIDE QUANTIQUE

Le vide existe-t-il ? Et, si oui, de quoi est-il fait ? La physique quantique vient apporter de nouveaux éléments de réponse à ces questions essentielles de la science.

La nature a-t-elle vraiment horreur du vide ?

L'existence et la nature du vide ont longuement été débattues dans l'histoire de la pensée. Pour Aristote (IVe siècle av. J.-C.), philosophe antique dont la conception du monde domina les sciences pendant plus de 2 000 ans, le vide ne pouvait tout simplement pas exister, et la pensée des atomistes antiques, concevant quant à eux le monde comme étant fait d'atomes et de vide, resta longtemps marginale. Roger Bacon, savant du Moyen Âge, disait même : « La nature a horreur du vide. »

À la place du vide, Aristote décrivit une substance inaltérable, l'éther, constituant la partie du monde supralunaire (allant de la Lune aux étoiles). L'existence de cette substance servit par la suite à expliquer comment se transmettait la force gravitationnelle ou encore comment se propageait la lumière. Jamais personne ne réussit cependant à détecter cette mystérieuse substance, et Einstein, au début du XXe siècle, avec sa théorie de la relativité, affirma que la physique n'avait pas besoin de l'éther et que la lumière se propageait dans le vide, postulant ainsi l'existence de ce dernier.

La physique classique définit aujourd'hui le vide comme ce qu'il reste dans un volume donné après qu'on y a supprimé tout ce qu'il contenait (autant les particules de matière que celles de lumière). Le vide est alors l'absence de toute matière, une sorte d'espace pur.

Le vide de la physique quantique

La définition du vide dépend néanmoins de la théorie dans le cadre de laquelle on discute. En physique quantique, à la différence de la physique classique, le vide n'est pas de l'espace vide : ce dernier contient effectivement de l'énergie, que les physiciens quantiques appellent « énergie du vide ».

Ils expliquent aussi que cette énergie est de la matière à l'état virtuel, qui attend de devenir réelle. Les particules de matière virtuelles, ne possédant pas suffisamment d'énergie pour se matérialiser, ne sont pas directement observables. Pour exister, elles ont besoin d'un apport d'énergie grâce auquel elles pourraient devenir réelles. Le vide décrit par la physique quantique prend le nom de « vide quantique ». Il bouillonne de particules virtuelles, et ses fluctuations auraient engendré les particules de matière dans l'Univers juste après le Big Bang.

L'effet Casimir

Si l'existence de l'énergie du vide est demeurée longtemps du domaine de la théorie, l'effet Casimir désigne une expérience récente démontrant que le vide est vraiment plein d'énergie.

Dans cette expérience, rendue possible par les nanotechnologies, on place deux plaques métalliques non chargées de dimensions très petites face à face et extrêmement proches (à moins d'1 millième de millimètre de distance). Une pression s'exerce alors sur les plaques, de l'extérieur vers l'intérieur, générée par les photons du vide quantique dont la densité entre les plaques est inférieure à celle de l'extérieur, et les plaques sont attirées l'une vers l'autre.

Si on fait par ailleurs osciller l'une des plaques à une vitesse proche de celle de la lumière, une partie des photons virtuels présents dans la cavité entre les deux plaques se transforment en photons réels. L'oscillation de l'espace entre les deux plaques arrache des photons au vide quantique ; ces photons se matérialisent et de la lumière est émise. Cet effet a été mesuré en 2011 par une équipe de recherche suédoise.

Le vide quantique

L'essentiel en 5 secondes

» **L'existence et la nature du vide ont très longtemps été débattues dans la pensée humaine.**

» **La physique classique définit le vide comme ce qu'il reste dans un volume donné après qu'on y a supprimé tout ce qu'il contenait.**

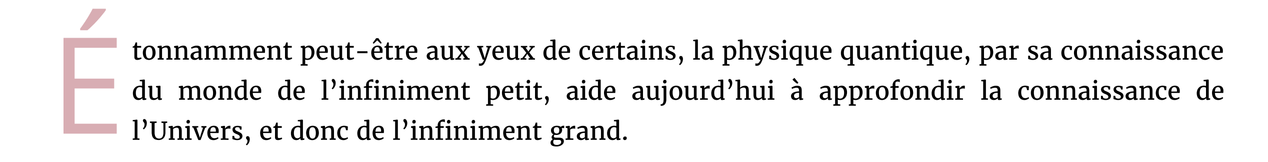
» **La physique quantique considère quant à elle que le vide contient de l'énergie qui est de la matière à l'état virtuel.**

» **L'effet Casimir est une expérience démontrant que le vide est plein d'énergie.**



44

LA QUANTIQUE ET L'UNIVERS


Étonnamment peut-être aux yeux de certains, la physique quantique, par sa connaissance du monde de l'infiniment petit, aide aujourd'hui à approfondir la connaissance de l'Univers, et donc de l'infiniment grand.

L'Univers vu de l'infiniment petit

Le physicien belge Georges Lemaître (1894-1966), l'un des pères fondateurs de la théorie du Big Bang, fut le premier à tenter de relier la physique de l'infiniment petit à celle de l'infiniment grand : « Une cosmogonie vraiment complète devrait expliquer les atomes comme les soleils », disait-il.

Le développement de la cosmologie (l'étude de l'Univers dans son ensemble) depuis le début du XXe siècle lui donna raison. À chaque pas en avant dans la description de l'Univers, l'approfondissement des connaissances concernant les constituants de la matière avec la physique quantique vient donner un formidable coup de main à la physique qui tente de comprendre l'Univers. Aujourd'hui, astrophysiciens et physiciens travaillent main dans la main quand il s'agit de comprendre l'Univers et les objets célestes qui le peuplent.

Grâce aux accélérateurs de particules, il est notamment possible de simuler les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial et d'étudier le comportement de la matière à cette époque. Les physiciens savent ainsi reconstituer la nucléosynthèse (la formation des noyaux atomiques) qui a eu lieu au tout début de l'Univers puis dans les étoiles ; ils étudient les familles de particules, les briques fondamentales de tout l'Univers, ou tentent de percer les secrets de l'antimatière.

Le vide quantique et l'Univers

Certains scientifiques pensent que le vide tel que conçu par la physique quantique, qui contient en puissance la matière sous forme d'énergie, pourrait avoir engendré spontanément l'Univers.

Au commencement, il y aurait donc eu le vide quantique, bouillonnant d'énergie et de particules virtuelles. Pour que la matière virtuelle du vide quantique devienne réelle, elle a eu besoin d'énergie. Selon cette théorie, ce serait la force de gravitation qui aurait apporté cette énergie. Cela aurait eu lieu lors d'une phase d'inflation – une période d'expansion de l'espace très rapide – juste après le Big Bang. Les particules virtuelles du vide quantique, grâce à cet apport d'énergie, seraient à ce moment devenues réelles. On décrit ce phénomène en parlant aussi des fluctuations du vide quantique qui auraient engendré la matière.

Les Univers multiples

En physique quantique, on considère que tout système non étudié superpose différents états (comme une particule qui peut être dans plusieurs lieux à la fois) qui ont chacun une certaine probabilité de se réaliser. Ce n'est qu'au moment de la mesure, et donc par l'intervention d'un observateur, qu'un état est choisi, ce qu'on appelle la « réduction du paquet d'ondes ». Pour beaucoup, ce phénomène de superposition est absurde, comme pour le physicien Erwin Schrödinger qui inventa dans les années 1930 une expérience de pensée avec un chat pour le montrer.

Un autre physicien, Everett, tenta de résoudre la situation paradoxale des états superposés en formulant la théorie des mondes multiples en 1957. Selon Everett, lors de la mesure, la réduction du paquet d'ondes n'est qu'une illusion : en réalité, le monde se scinderait en autant d'Univers qu'il y a d'états superposés définis par les probabilités, une multiplicité de mondes dont nous n'observerions que l'une des réalités possibles.

Dans l'expérience du chat de Schrödinger (qui est dans l'état superposé mort et vivant), on imagine, lors de la mesure, l'Univers se scindant en deux parties : l'une où le chat est vivant, et l'autre où il est mort.

La quantique et l'Univers

L'essentiel en 5 secondes

- **La physique quantique contribue à une meilleure compréhension de l'Univers.**
- **Les accélérateurs de particules recréent les conditions de l'Univers primordial.**
- **Le vide quantique aiderait à mieux comprendre ce moment qu'on appelle Big Bang.**
- **L'hypothèse de l'existence de mondes multiples résout le paradoxe du chat de Schrödinger.**

45

LA GRAVITÉ QUANTIQUE

L'association de ces deux mots est un véritable casse-tête pour les physiciens. Mais le défi en vaut la peine, car la gravité quantique serait la voie pour remonter encore plus loin dans l'exploration du passé de l'Univers.

Aux limites de la connaissance

La description de l'évolution de l'Univers est possible grâce aux équations de la relativité générale d'Einstein, mais jusqu'à une certaine limite, appelée symboliquement par les physiciens le « mur de Planck ».

Les équations de la relativité générale définissent une singularité quand on remonte le temps de l'histoire de l'Univers. Cette singularité, comprise souvent à tort comme l'instant originel, est un résultat mathématique qui a une autre signification : au moment lui correspondant, les paramètres de l'Univers (la température, la densité) deviennent infiniment grands, ce qui est, d'un point de vue physique, incohérent.

Le comportement de la matière de l'Univers est aujourd'hui bien compris grâce à la physique quantique. Quand la température et la densité de l'Univers deviennent cependant extrêmement grandes au voisinage de cette singularité, la matière de l'Univers est soumise à un champ de gravité intense, et la physique quantique n'est plus capable de décrire son comportement.

Les théories physiques peuvent donc seulement décrire de façon cohérente l'évolution de l'Univers jusqu'à une certaine limite dans le passé, marquant la limite de la connaissance actuelle.

Aller voir plus loin

Pour pouvoir explorer ce qu'il y aurait au-delà de cette limite, pour remonter encore plus loin le temps dans le passé de l'Univers, les scientifiques doivent faire appel à leur intellect, les conditions extrêmes qui régnaient à cette époque n'étant pas reproductibles en laboratoire. Ce sont donc les théoriciens qui se penchent sur la question : leur défi consiste à inventer une nouvelle théorie qui corrige les incohérences et réconcilie les théories de la relativité générale et de la physique quantique. En effet, si la relativité générale décrit avec une grande précision l'effet des champs de gravité sur le comportement de la matière (on dit aussi qu'elle est une théorie de la gravitation), elle ne sait pas tenir compte des acquis de la physique quantique.

Cette nouvelle théorie est celle de la gravité quantique : elle serait capable de décrire le comportement de la matière d'une manière quantique dans un intense champ de gravité. Cette recherche passionne nombre de théoriciens qui tentent actuellement de relever le défi.

La gravité quantique en théorie

Sur les terres de la physique théorique, la gravité quantique prend différentes formes :

> » La théorie des cordes décrit les particules élémentaires comme des êtres à une seule dimension, de masse nulle, des sortes de filaments infiniment petits qu'on appelle des « cordes ». Ces cordes vibrent à différentes fréquences et, à la manière des cordes d'un violon qui émettent des sons, elles engendrent les particules, dont le graviton, responsable de la gravitation : ces cordes obéissent alors autant aux lois de la physique quantique qu'à celles de la relativité générale.

» Dans la gravitation quantique à boucles, l'espace-temps n'est plus une trame continue mais, de même que la matière est constituée de particules, il est composé de petits grains élémentaires, des sortes de minuscules boucles, et peut être décrit par les lois de la physique quantique. En supposant que la structure de l'espace-temps est granulaire, les chercheurs réconcilient ainsi la relativité générale et la physique quantique.
» La théorie du vide quantique considère enfin que ce dernier, contenant la matière en puissance sous forme d'énergie, aurait engendré spontanément l'Univers lors de fluctuations du vide, grâce à la force de gravitation.

La gravité quantique

L'essentiel en 5 secondes

» **La description de l'Univers n'est possible que jusqu'à une certaine limite dans le passé, au-delà de laquelle les théories de la physique se contredisent.**
» **Une théorie de la gravité quantique serait capable de décrire le comportement de la matière d'une manière quantique dans un intense champ de gravité.**
» **Parmi les théories candidates, il y a celle des cordes, celle de la gravitation quantique à boucles, ou encore celle du vide quantique.**

46

LA QUANTIQUE AU QUOTIDIEN

Sans la physique quantique, le monde moderne ne serait pas ce qu'il est. La connaissance des lois qui régissent le monde de l'infiniment petit a donné lieu à l'invention de nombreux objets qui font aujourd'hui partie intégrante de notre quotidien.

Les premières applications

La découverte de la constitution de l'atome et des niveaux d'énergie quantifiés correspondant aux différents états que peuvent prendre les électrons situés autour du noyau ont favorisé le développement des premières applications de la physique quantique.

La plus connue d'entre elles est sans doute le laser, dont le principe est découvert et décrit en 1916 par (encore et toujours) Einstein, se fondant sur l'absorption et l'émission des photons par l'atome. Le laser est un dispositif qui émet un rayon lumineux en un étroit faisceau, unidirectionnel et d'une grande pureté spectrale : si l'ancêtre du laser, le maser, n'émettait que de la lumière dans le domaine micro-onde, on trouve aujourd'hui des lasers qui peuvent émettre dans toute la gamme du rayonnement électromagnétique (rayons X, UV, IR, etc.).

La physique quantique a aussi ouvert le développement du microscope électronique, qui utilise un faisceau d'électrons pour voir des images plusieurs millions de fois agrandies par rapport à un microscope optique. Le microscope à effet tunnel, quant à lui, utilise l'effet de même nom pour ausculter des surfaces.

Le monde de l'électronique

Smartphones, tablettes, disques durs, appareils photos numériques, consoles de jeux, satellites, radios ou télévisions : tous ces objets électroniques quotidiens (et, de manière générale, tous les appareils comprenant un peu d'électronique) ont pu être inventés grâce aux connaissances de la physique quantique.

Avec la découverte des électrons et des photons (particules fondamentales de l'électromagnétisme) ainsi que de leurs comportements, il a été possible de mieux comprendre les isolants (bois, plastique, coton, etc.), les conducteurs électriques (métaux), mais aussi les semi-conducteurs qui ont une conductivité intermédiaire. Ces derniers sont à l'origine du transistor, composant et brique élémentaire de l'électronique, constituant de base de toutes nos technologies modernes.

Les puces électroniques sont des éléments miniatures sur lesquels peuvent être aujourd'hui interconnectés, par des circuits intégrés, quelques centaines de millions à plusieurs milliards de transistors.

La mesure du temps et le repérage dans l'espace

On sait aujourd'hui mesurer le temps d'une manière extrêmement précise grâce aux horloges atomiques. Essentielles à nos instruments modernes (satellites de communication, etc.), elles s'appuient sur l'atome pour définir l'étalon de la seconde. Lorsqu'un électron dans un atome passe à un niveau d'énergie moindre, il émet un photon qui pulse à une certaine fréquence. Certaines fréquences de « transition atomique » sont mesurables. On définit aujourd'hui la seconde atomique (l'étalon international du temps) grâce à l'atome de césium.

Le système GPS (la radionavigation par satellite) existe ainsi grâce aux horloges atomiques. La constellation des 24 satellites du réseau GPS émet en permanence des signaux radio donnant heure, références et position. Chaque satellite repose sur une horloge atomique embarquée, livrant des informations d'une précision extrême (au milliardième de seconde) et entraînant la synchronisation du système entier.

La quantique au quotidien

L'essentiel en 5 secondes

- **Des applications de la physique quantique ont vu le jour dès les premières découvertes des lois du monde de l'infiniment petit, la plus connue d'entre elles étant le laser.**
- **Tous les objets électroniques, par l'utilisation du transistor, tiennent de la physique quantique.**
- **Le repérage dans le temps et dans l'espace est aujourd'hui fondé sur la physique quantique, par le biais des horloges atomiques.**

47

LES APPLICATIONS DU FUTUR

Ces dernières décennies, nos capacités à utiliser les phénomènes quantiques s'accroissent considérablement. Parmi ces phénomènes, l'intrication (le comportement identique et simultané de deux particules ayant une histoire commune) et la superposition (la possibilité qu'une particule soit à un instant donné dans plusieurs états différents) ouvrent la voie à des applications futuristes tout à fait étonnantes.

La téléportation quantique

L'exploitation du phénomène d'intrication quantique a permis le développement de la téléportation quantique. Contrairement à ce que son nom laisse entendre, celle-ci n'est pas le transport à distance de la matière, mais celui de l'information (comme si on pouvait transporter l'esprit, mais pas le corps).

Les scientifiques parviennent aujourd'hui à transmettre à distance l'information sur l'état quantique d'une particule à une autre particule avec laquelle elle est intriquée : ils téléportent de l'information quantique. Plusieurs expériences ont déjà été réalisées, notamment avec des photons intriqués, dont l'information a été transmise de l'un à l'autre sur plusieurs centaines de kilomètres.

Le transport d'information par téléportation quantique n'a rien à voir avec les moyens de communication actuels. Par exemple, l'envoi d'un email requiert ondes wifi, câbles, fibres optiques, etc. et n'est pas instantané. La téléportation quantique ne nécessite quant à elle aucun support matériel pour la transmission de l'information.

La cryptographie quantique

Malgré ce que laisse entendre son nom, la cryptographie quantique n'est pas une méthode pour crypter des messages utilisant la physique quantique, mais un ensemble de protocoles favorisant l'échange de messages cryptés entre un émetteur et un destinataire en assurant, grâce aux lois de la physique quantique, la transmission de l'information avec un niveau de sécurité non atteignable par les procédés classiques.

On utilise pour cela des paires de photons intriqués partagés entre l'émetteur et le destinataire. Toute mesure effectuée sur une particule précise son état et, dans le même temps, celui de l'autre particule. On crée ainsi une clé quantique que, grâce aux lois de la physique quantique, aucun espion ne pourra intercepter au moment ou émetteur et destinataire échangent leurs particules intriquées. Grâce au contrôle de l'état des photons, on peut vérifier l'existence d'une intrusion étrangère : toute tentative d'intrusion dans un système quantique perturbe en effet les états quantiques des photons utilisés.

Depuis plusieurs années, la cryptographie quantique n'est plus une curiosité de laboratoire et a déjà été mise plusieurs fois en pratique.

L'ordinateur quantique

Un ordinateur classique repose sur une unité technologique appelée le « bit ». Le bit ne peut prendre que deux valeurs : le 0 ou le 1.

En physique quantique, on retrouve le concept de bit au travers du spin, qui est l'une des caractéristiques d'une particule pouvant prendre deux valeurs, assimilables au 0 et au 1. Le

phénomène de superposition observé dans le monde de l'infiniment petit introduit néanmoins un troisième état : l'état superposé « 0 et 1 ». Le bit de l'ordinateur quantique, nommé « qubit » (quantum bit), peut donc prendre 3 valeurs : 0, 1 ou l'état superposé « 0 et 1 ». L'utilisation du qubit en informatique décuplerait donc les capacités de calcul des ordinateurs.

Le domaine de recherche des calculateurs quantiques, à la frontière de la physique et de l'informatique, n'en est qu'à ses débuts, mais il est très actif. Nous sommes malgré tout encore loin de disposer de cet ordinateur de nouvelle génération. Et les scientifiques sont face à un défi de taille : contourner, dans des systèmes de plus en plus gros, le phénomène de décohérence quantique, celui-ci ayant tendance à brouiller les lois quantiques lorsque la taille des systèmes augmente.

Les applications du futur

L'essentiel en 5 secondes

- **La téléportation quantique consiste à transporter de l'information d'une particule à une autre grâce au phénomène d'intrication.**
- **Grâce à la cryptographie quantique, on peut envoyer des messages cryptés avec une sécurité inégalée.**
- **L'ordinateur quantique, avec pour base le phénomène de superposition, décuplerait les capacités de calcul.**



48

PHYSIQUE QUANTIQUE ET VIVANT

On a longtemps pensé que la physique quantique ne s'appliquait qu'au monde des particules ou des atomes, qu'il y avait une frontière dans l'ordre des grandeurs au-delà de laquelle elle n'était plus valable, et que le recours à la physique classique restait nécessaire pour décrire le monde qui nous entoure. Aujourd'hui, on découvre que certains phénomènes du monde du vivant seraient gouvernés par les lois quantiques.

La biologie quantique

Certains processus biologiques subtils, difficilement explicables avec la biologie et la chimie classique, deviennent compréhensibles en faisant appel à la physique quantique : des effets quantiques joueraient un rôle essentiel au sein du vivant.

Ce constat contredit la théorie de la décohérence qui explique pourquoi les phénomènes quantiques observés dans le monde de l'infiniment petit disparaissent dans le monde à notre échelle : les interactions permanentes des objets macroscopiques avec l'environnement leur font perdre leurs comportements quantiques.

En mettant en évidence des phénomènes quantiques cohérents à notre échelle, le monde du vivant remet les cartes sur table. Comme lorsque le problème du corps noir ou l'effet photoélectrique ont été résolus avec l'élaboration de la physique quantique – ce qui fut une véritable révolution dans le monde des physiciens –, ces découvertes en biologie pourraient-elles marquer le début d'une profonde révolution scientifique ? La biologie actuelle en est-elle au stade où était la physique classique avant la découverte de la physique quantique ?

La biologie quantique est dans tous les cas aujourd'hui une discipline à part entière, nouvelle, qui étudie les processus biologiques en faisant appel aux effets quantiques.

La photosynthèse et autres processus biologiques quantiques

Les biologistes ont observé des effets quantiques opérant dans divers domaines du vivant.

Dans le cadre de la photosynthèse, par exemple, les processus à l'œuvre sont régis par des lois quantiques qui procurent à ce phénomène essentiel pour le vivant une formidable efficacité. Chez les plantes vertes ou même chez certaines algues, on a vu que des récepteurs composés de chlorophylle sont capables d'absorber des photons alors même que la lumière reçue est très faible.

Les oiseaux migrateurs s'orientent grâce au champ magnétique terrestre par un sens qui leur fait détecter les champs magnétiques, la magnéto-réception, dont le fonctionnement fait intervenir des processus quantiques.

On observe encore des processus quantiques dans les phénomènes de bioluminescence, qui est la lumière émise par les êtres vivants (vers luisants, etc.).

Sur le chemin de l'innovation

La biologie quantique est aujourd'hui au cœur de programmes de recherche s'inspirant de la nature et du vivant, comme le biomimétisme.

La photosynthèse est notamment incroyablement efficace : parvenir à réaliser une photosynthèse artificielle qui capture l'énergie solaire aussi bien que le font les plantes (avec

un rendement frôlant les 100 %) pour fabriquer des panneaux solaires (qui ont actuellement un rendement de 15 %) serait un progrès considérable.

Comprendre le fonctionnement du système responsable de l'orientation des oiseaux migrateurs pourrait faire voir le jour à de nouveaux systèmes GPS embarqués.

Enfin, avoir découvert que des phénomènes quantiques cohérents ont lieu dans la nature à notre échelle redonne espoir à la recherche concernant les ordinateurs quantiques, dont le principe restait jusqu'ici difficilement crédible à cause du phénomène de décohérence.

LES COULEURS DU MONDE QUANTIQUE

Pour un spécialiste de la physique quantique, le monde de la physique classique est la version en noir et blanc d'un monde en couleurs. La physique classique ne suffit pas à saisir notre environnement dans sa richesse. Pour beaucoup de physiciens aujourd'hui, le monde est quantique à toutes les échelles, et la physique classique n'est qu'une approximation utile à notre échelle.

Physique quantique et vivant

L'essentiel en 5 secondes

» **La biologie quantique s'occupe d'étudier des processus à l'œuvre dans les organismes vivants faisant intervenir les lois de la physique quantique.**

» **La photosynthèse, l'orientation des oiseaux migrateurs ou encore la bioluminescence sont régis par des processus quantiques.**

» **La compréhension de ces phénomènes ouvre la voie à de nombreuses innovations dans le domaine du biomimétisme.**

49

LE CERVEAU EST-IL QUANTIQUE ?

Le fonctionnement d'une partie de notre cerveau pourrait-il être gouverné par les lois de la physique quantique, et y aurait-il un lien entre cette dernière et la conscience ? Des scientifiques de renom se penchent sur ces questions, dont l'étude n'en est encore qu'à ses débuts.

Des hypothèses

Un certain nombre de scientifiques, spécialistes du cerveau ou physiciens, font l'hypothèse que notre cerveau serait un outil quantique de traitement de l'information (comme un ordinateur quantique), et que le phénomène de conscience pourrait être lié à des processus quantiques. Ils s'appuient sur la neurophysiologie, plus particulièrement sur de possibles effets de cohérence quantique dans le système nerveux, qui en assureraient la cohérence à grande échelle et formeraient les bases matérielles de la conscience.

La conscience quantique est ainsi une hypothèse postulant que des phénomènes quantiques sont impliqués dans le fonctionnement du cerveau, et en particulier dans l'émergence de la conscience.

Si le rôle de la physique quantique dans les rapports entre la conscience et la réalité matérielle est discuté pratiquement depuis sa découverte, ce domaine de recherche active n'en est qu'à ses débuts, et rien n'a encore été démontré. Des expériences se mettent peu à peu en place pour peut-être un jour montrer que notre cerveau fonctionne comme un ordinateur quantique.

Un défi à relever

Le fait que l'origine de la conscience puisse être liée à des phénomènes quantiques ou que le cerveau puisse fonctionner partiellement comme un ordinateur quantique laisse beaucoup de chercheurs sceptiques, et cela pour de bonnes raisons.

Ils se demandent comment le phénomène de décohérence (celui qui élimine les effets quantiques à notre échelle) peut être contrecarré dans le cerveau. Ce phénomène freine aujourd'hui la recherche dans la conception des ordinateurs quantiques. Des idées sont émises pour faire face à ce défi, notamment grâce au développement de la biologie quantique, mais tout reste encore très hypothétique.

Si le sujet est à la frontière de la science (le risque étant de se perdre dans des considérations métaphysiques), les scientifiques travaillant actuellement sur ces thèmes le font, en revanche, avec toute la rigueur scientifique requise, et sont plutôt considérés comme des pionniers dont les recherches ouvriront certainement de nouveaux horizons dans la connaissance de notre monde et de nous-mêmes.

IL Y A QUANTIQUE ET QUANTIQUE !

Ces réflexions légitimes de scientifiques éminents sur les rapports entre esprit et matière ont malheureusement souvent été mal interprétées et comprises, voire déformées et présentées comme des faits établis, alors que ce ne sont encore que des hypothèses.

C'est ainsi que les phénomènes quantiques ont été récupérés par la vague New Age ou que l'on peut entendre parler de prétendues thérapies quantiques, qui ne reposent sur aucune base scientifique sérieuse.

Le cerveau est-il quantique ?

L'essentiel en 5 secondes

- **Des scientifiques formulent l'hypothèse qu'une partie du cerveau pourrait se comporter comme un ordinateur quantique et que des processus quantiques pourraient être à l'origine de l'émergence de la conscience.**
- **Beaucoup s'interrogent néanmoins sur la manière dont le phénomène de décohérence pourrait être contrecarré dans le cerveau.**
- **Ces hypothèses ont malheureusement été présentées comme des faits établis dans des milieux pseudo-scientifiques, alors que ce domaine de recherche n'en est encore qu'à ses débuts.**

50

CHANGER

DE REGARD

Partir à la découverte de la physique quantique, c'est comme voyager dans un pays lointain : c'est l'exploration d'un monde nouveau dont la culture, l'environnement et les codes sont radicalement différents, et dont la rencontre élargit notre regard, nous ouvre un éventail de possibles.

Du constat qui déstabilise…

Le constat de l'incompréhensible, de l'étrange, de la différence, dérange et déstabilise. Face au connu routinier et rassurant, l'inconnu, surprenant et souvent inquiétant, est à même de fermer les esprits, ou bien au contraire de les agiter suffisamment pour renouveler la pensée et initier du neuf. Dans l'histoire de la physique quantique, il y a ceux qui ne purent y adhérer, et les autres, au contraire, qui se sont nourris de ces découvertes étonnantes pour construire une nouvelle pensée, plus riche que la précédente.

Selon notre vision des choses construite *via* notre rapport au monde macroscopique, il semble simplement impossible que des objets quantiques puissent être tour à tour onde et corpuscule, dénués de trajectoire, dans plusieurs états à la fois, que nous ne puissions les observer sans les perturber (ce qui questionne leur réalité en dehors de leur observation), ou que l'indéterminisme règne en maître dans le monde de l'infiniment petit.

À l'opposé des lois classiques de la science de la fin du XIXe siècle et de la vision d'une mécanique bien huilée qui régirait les phénomènes, le monde quantique est contre-intuitif, déroute et choque le sens commun. Abstrait, les images simples n'y ont pas leur place, et pour penser l'impensable, les scientifiques ont recours aux mathématiques, seules aptes à décrire cet univers inaccessible à nos sens. Ce dernier, si éloigné de notre monde familier, n'est en effet pas abordable avec nos concepts habituels et remet même en question une certaine idée de la science, dans sa capacité à décrire le monde tel qu'il est.

… à un nouveau regard plus riche sur les choses

S'ouvrir au monde quantique, c'est accepter une nouvelle logique, différente de celle qui nous sert à appréhender le monde à notre échelle ; c'est découvrir les extraordinaires capacités de notre intellect à explorer un monde impalpable par nos sens, celui de l'infiniment petit.

L'exploration du monde quantique oblige à sortir de notre système de représentation classique et à créer un nouveau langage. À dépasser nos préjugés, à remettre en question notre accès à la réalité du monde, à s'interroger sur notre rapport aux choses. Il s'agit alors d'imaginer une nouvelle manière de concevoir la réalité, non morcelée et localisée comme dans le monde classique, mais plutôt globale et interdépendante.

Dans ce cheminement de l'esprit humain qu'est la physique quantique, une nouvelle conception de la science apparaît, un nouveau rapport au monde, une nouvelle pensée plus riche que la précédente, qui élargit notre regard et qui prend en compte le fait que nous faisons partie intégrante du réel. La relation que nous avons avec lui doit être prise en compte chaque fois que nous voulons en parler.

Changer de regard

L'essentiel en 5 secondes

- **Au premier abord, les phénomènes du monde quantique sont profondément déstabilisants et choquent le sens commun.**
- **Une fois nos préjugés dépassés, la découverte de la physique quantique ouvre de nouveaux horizons dans la pensée et une autre manière de voir le monde.**
- **Se familiariser avec la physique quantique est un formidable exercice d'ouverture d'esprit.**

INDEX

Accélérateurs de particules

voir aussi : Les particules élémentaires

Antimatière

voir aussi : L'équation de Dirac, Le vide quantique, Les accélérateurs de particules

Applications du futur

voir aussi : Les ondes de matière, Le chat de Schrödinger, L'intrication quantique, La décohérence quantique

Atome quantique

voir aussi : Les atomes, L'infiniment petit, c'est comment ?, Les raies spectrales, Le tableau périodique des éléments

Atomes

voir aussi : L'atome quantique

Bande à Bohr

voir aussi : L'atome quantique, L'interprétation de Copenhague, Le congrès Solvay, Einstein et la quantique, Question de réalisme

Changer de regard

voir aussi : Question de réalisme

Chat de Schrödinger

voir aussi : Les ondes de matière, La mesure quantique, Einstein et la quantique, La décohérence quantique

Congrès Solvay

voir aussi : La bande à Bohr, L'interprétation de Copenhague, Einstein et la quantique

Constante de Planck

voir aussi : Le corps noir, Les quanta, Le principe d'incertitude, La quantique et l'Univers

Corps noir

voir aussi : Les ondes, Les quanta

Décohérence quantique

voir aussi : Le chat de Schrödinger, La mesure quantique

Diagrammes de Feynman

voir aussi : L'électrodynamique quantique, La théorie quantique des champs

Dualité de la lumière

voir aussi : Les atomes, Les ondes, Le photon, L'effet photoélectrique, L'onde de matière, L'expérience des deux fentes

Effet photoélectrique

voir aussi : Le corps noir, Les quanta, L'électron, Le photon, L'atome quantique

Effet tunnel

voir aussi : La physique classique, La quantique au quotidien

Einstein et la quantique

voir aussi : L'interprétation de Copenhague, Le congrès Solvay, L'intrication quantique

Électrodynamique quantique

voir aussi : L'atome quantique, L'équation de Dirac, Les diagrammes de Feynman, La théorie quantique des champs

Électron

voir aussi : L'atome quantique, L'effet photoélectrique, L'onde de matière, L'équation de Dirac

Équation de Dirac

voir aussi : L'antimatière

Expérience des deux fentes

voir aussi : L'atome quantique, La dualité de la lumière

Expérience du choix retardé

voir aussi : L'expérience des deux fentes

Forces fondamentales

voir aussi : Le monde du noyau, Les particules élémentaires, La gravité quantique

Gravité quantique

voir aussi : Le vide quantique

Inégalités de Bell

voir aussi : L'interprétation de Copenhague, Einstein et la quantique, L'intrication quantique

Interprétation de Copenhague

voir aussi : La bande à Bohr, La mesure quantique, Le congrès Solvay, Einstein et la quantique

Intrication quantique

voir aussi : L'interprétation de Copenhague, Einstein et la quantique, Les inégalités de Bell

L'infiniment petit, c'est comment ?

voir aussi : La mesure quantique, Question de réalisme, Changer de regard

Le cerveau est-il quantique ?

voir aussi : La décohérence quantique, Physique quantique et vivant

Matière inconnue

voir aussi : Les accélérateurs de particules

Mesure quantique

voir aussi : L'expérience des deux fentes, Le chat de Schrödinger, L'interprétation de Copenhague, Question de réalisme

Monde du noyau

voir aussi : L'atome quantique, Le tableau périodique des éléments, Les forces fondamentales

Neutrino

voir aussi : Le monde du noyau, Les particules élémentaires

Nombres quantiques

voir aussi : L'atome quantique, Les raies spectrales, Le tableau périodique des éléments

Ondes de matière

voir aussi : Les quanta, La dualité de la lumière, L'atome quantique, Le chat de Schrödinger

Ondes

voir aussi : Les ondes de matière

Particules élémentaires

voir aussi : Le photon, L'électron, La théorie quantique des champs, Le monde du noyau, Le quark, Le neutrino, Les accélérateurs de particules, Les forces fondamentales, La matière inconnue

Photon

voir aussi : L'électron, L'effet photoélectrique, La dualité de la lumière

Physique classique

voir aussi : Les atomes, Les ondes, Le corps noir

Physique quantique et vivant

voir aussi : La décohérence quantique, Le cerveau est-il quantique ?

Principe d'incertitude

voir aussi : La bande à Bohr, La mesure quantique, L'interprétation de Copenhague, Question de réalisme

Quanta

voir aussi : Le corps noir, La constante de Planck, Les photons, L'effet photoélectrique, L'atome quantique

Quantique au quotidien

voir aussi : L'atome quantique, L'effet tunnel, Les applications du futur

Quantique et l'Univers

voir aussi : Le chat de Schrödinger, Les accélérateurs de particules, Le vide quantique

Quark

voir aussi : Le monde du noyau, Les particules élémentaires

Question de réalisme

voir aussi : Einstein et la quantique, L'interprétation de Copenhague, La mesure quantique, Changer de regard

Raies spectrales

voir aussi : Les ondes, L'atome quantique

Tableau périodique des éléments

voir aussi : Les atomes, L'atome quantique

Théorie quantique des champs

voir aussi : L'électrodynamique quantique, Les diagrammes de Feynman, Les particules élémentaires, Les accélérateurs de particules, Les forces fondamentales

Vide quantique

voir aussi : La gravité quantique, L'interprétation de Copenhague, Einstein et la quantique, Question de réalisme

Sommaire

Couverture

La physique quantique pour les Nuls en 50 notions clés - L'essentiel pour tout comprendre

Copyright

Introduction

- À la découverte de l’infiniment petit
- Penser l’impensable
- L’exploration du monde quantique

LA PHYSIQUE CLASSIQUE

- La description du monde classique
- L’apogée de la connaissance scientifique
- Un débat au tournant du siècle

LES ATOMES

- Les atomistes antiques
- La preuve que les atomes existent
- Les atomes ne sont pas indivisibles

LES ONDES

- Les ondes en images
- Les ondes électromagnétiques
- Le spectre électromagnétique

LE CORPS NOIR

- Qu’est-ce qu’un corps noir en physique ?
- Le problème…
- … Et sa résolution

LES QUANTA

- L’introduction des quanta en physique
- Les quanta d’Einstein
- La théorie des quanta

LA CONSTANTE DE PLANCK

Son histoire

Une constante universelle

Constante de Planck et compagnie

L’ÉLECTRON

La découverte de l’électron

Caractéristiques

L’électron en physique quantique

LE PHOTON

Une particule de lumière

Caractéristiques

Photons et électrons, intimité quantique

L’EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

Un phénomène d’abord incompris

L’explication d’Einstein

En pratique

LA DUALITÉ DE LA LUMIÈRE

Onde ou particule ?

Onde et particule !

La dualité en général

L’ATOME QUANTIQUE

L’atome comme un système solaire

L’atome selon Bohr

L’abandon de l’image

LES RAIES SPECTRALES

L’énigme des raies

La physique quantique lève le voile

Un outil incontournable de la physique moderne

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

La classification des éléments

L’organisation du tableau au regard de la théorie quantique

LES NOMBRES QUANTIQUES

Au nombre de quatre

Le principe d'exclusion

L'EXPÉRIENCE DES DEUX FENTES

Les fentes de Young

Deux fentes face à l'étrangeté quantique

Matière à penser

LA BANDE À BOHR

Niels Bohr

L'institut de Copenhague

Bohr face à Einstein

LE PRINCIPE D'INCERTITUDE

Position ou vitesse

Une particule n'a pas de trajectoire

L'introduction de l'indéterminé en science

LES ONDES DE MATIÈRE

Fou ou génial ?

Des paquets d'ondes

L'équation de Schrödinger

LE CHAT DE SCHRÖDINGER

Des probabilités et des superpositions

Une expérience de pensée

La nouvelle quantique

L'ÉQUATION DE DIRAC

La vitesse de la lumière en physique quantique

Drôle de découverte

La preuve

L'ANTIMATIÈRE

Dans l'Univers primordial

La disparition de l'antimatière

LAMESURE QUANTIQUE

Dans le monde classique

Dans le monde quantique

Introduction au débat

L’INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE

Les bizarreries du monde quantique

À Copenhague

L’opposition

LECONGRÈS SOLVAY

Historique

Le congrès de 1927

EINSTEIN ET LA QUANTIQUE

La philosophie d’Einstein

Ses expériences de pensée

L’INTRICATION QUANTIQUE

Un paradoxe ?

Démonstration

Conclusion

LES INÉGALITÉS DE BELL

Genèse des inégalités

En théorie

En pratique

QUESTION DE RÉALISME

La mécanique du monde

Un grain de sable quantique dans les rouages

Un réel multiple

LA DÉCOHÉRENCE QUANTIQUE

Constat

Explication

L’EFFET TUNNEL

Description

Explication quantique

En action

L'EXPÉRIENCE DU CHOIX RETARDÉ

Une expérience de pensée bien étrange

De la théorie à la pratique

Conclusions

L'ÉLECTRO DYNAMIQUE QUANTIQUE

De mystérieuses lignes de force

Le rôle des photons

L'apport de Feynman

LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN

Principe

Professeur Feynman

LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

Le pourquoi du comment

Un peu d'ordre

Insaisissable force de gravitation

L'INFINIMENT PETIT, C'EST COMMENT ?

Représentations simplistes

La physique quantique se passe de dessin

Vue sur l'atome

LE MONDE DU NOYAU

La radioactivité

Le noyau de l'atome

La physique nucléaire

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Les fermions

Les bosons

Le modèle standard

LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

Principe

Le plus grand accélérateur du monde

Les objectifs

LES FORCES FONDAMENTALES

La force électromagnétique

La force forte

La force faible

La force de gravitation

LE QUARK

La découverte des quarks

Des saveurs et des couleurs

Jamais seuls

LE NEUTRINO

La découverte du petit neutron

Une particule insaisissable

L'Univers des neutrinos

LA MATIÈRE INCONNUE

La matière noire

L'énergie noire

La matière inconnue existe-t-elle vraiment ?

LE VIDE QUANTIQUE

La nature a-t-elle vraiment horreur du vide ?

Le vide de la physique quantique

L'effet Casimir

LA QUANTIQUE ET L'UNIVERS

L'Univers vu de l'infiniment petit

Le vide quantique et l'Univers

Les Univers multiples

LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Aux limites de la connaissance

Aller voir plus loin

La gravité quantique en théorie

LA QUANTIQUE AU QUOTIDIEN

Les premières applications

Le monde de l’électronique

La mesure du temps et le repérage dans l’espace

LES APPLICATIONS DU FUTUR

La téléportation quantique

La cryptographie quantique

L’ordinateur quantique

PHYSIQUE QUANTIQUE ET VIVANT

La biologie quantique

La photosynthèse et autres processus biologiques quantiques

Sur le chemin de l’innovation

LE CERVEAU EST-IL QUANTIQUE ?

Des hypothèses

Un défi à relever

CHANGER DE REGARD

Du constat qui déstabilise…

… à un nouveau regard plus riche sur les choses

INDEX